

MECHANIKA

W Y D A W N I C T W O



CZASOPISMO  
TECHNICZNE

TECHNICAL  
TRANSACTIONS

9-M/2012

ZESZYT 26  
ROK 109

ISSUE 26  
YEAR 109

P O L I T E C H N I K I K R A K O W S K I E J

MECHANICS

Przewodniczący Kolegium Redakcyjnego  
Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej

Jan Kazior

Chairman of the Cracow University of Technology  
Press Editorial Board

Przewodniczący Kolegium Redakcyjnego  
Wydawnictw Naukowych

Józef Nizioł

Chairman of the Editorial Board

Architektura  
Automatyka  
Budownictwo  
Chemia  
Elektrotechnika  
Informatyka

Dariusz Kozłowski  
Piotr Kulczycki  
Marek Piekarczyk  
Krzysztof Pielichowski  
Piotr Drozdowski  
Stanisław Deniziak

Architecture  
Automatic Control  
Civil Engineering  
Chemistry  
Electrical Engineering  
Computer Science and  
Information Systems

Mechanika  
Nauki Podstawowe  
Środowisko

Józef Gawlik  
Włodzimierz Wójcik  
Stanisław Kandfer

Mechanics  
Fundamental Sciences  
Environmental Engineering

Sekretarz Sekcji Dorota Sapek Section Editor

©Copyright by Politechnika Krakowska  
Kraków 2012

# CZASOPISMO TECHNICAL TECHNICZNE TRANSACTIONS

Wersją pierwotną Czasopisma Technicznego jest wersja on-line

**ISSN 0011-4561**

**ISSN 1897-6328**

Wydawnictwo jest rejestrowane w bazie danych

BazTech <http://baztech.icm.edu.pl>

The CUT Press is registered in the database

BazTech <http://baztech.icm.edu.pl>

Wydawnictwo PK, ul. Skarżyńskiego 1, 31-866 Kraków

tel.: 12 628 37 25; fax: 12 628 37 60

e-mail: [wydawnictwo@pk.edu.pl](mailto:wydawnictwo@pk.edu.pl)

Adres do korespondencji: ul. Warszawska 24

31-155 Kraków

Projekt okładki: Jerzy Stefan

Druk i oprawę wykonano

w Dziale Poligrafii Politechniki Krakowskiej

Ark. wyd. 17. Ark. druk. 23

Podpisano do druku: 22.02.2013

Zam. 55/13 Nakład 170 egz.

9-M/2012

ZESZYT 26

ROK 109

ISSUE 26

YEAR 109



SERGEY ANISIMOV, DEMIS PANDELIDIS\*

## MODELOWANIE MATEMATYCZNE NOWOCZESNEGO WYMIENNIKA DO WYPARNEGO OCHŁADZANIA POWIETRZA WE WSPÓŁPRACY Z AMERYKAŃSKĄ KORPORACJĄ COOLERADO

---

## NUMERICAL STUDY OF NOVEL EVAPORATIVE HEAT AND MASS EXCHANGER IN COOPERATION WITH AMERICAN CORPORATION COOLERADO

### Streszczenie

W niniejszym artykule zaprezentowano rozwiązanie algorytmiczne modelu matematycznego nowoczesnego wymiennika do pośredniego ochładzania powietrza za pomocą odparowania cieczy, opartego na M-obiegu. Przedstawiono propozycję zapisu matematycznego procesów wymiany ciepła i masy zachodzących we wstępnej części urządzenia. Przedstawiono wstępne wyniki wielowariantowych symulacji numerycznych. Na ich podstawie przedstawiono charakterystyczne cechy procesów wymiany ciepła i masy w kanałach wypełnienia. Uzyskane wyniki ułatwiają pracę nad adaptacją wymiennika do polskich warunków klimatycznych.

*Słowa kluczowe: chłodzenie wyparne, M-obieg, energooszczędność*

### Abstract

This paper presents a mathematical model algorithmic solution for modern indirect evaporative exchanger, based on the M-cycle. Math notation is proposed to describe heat and mass transfer process occurring in the initial part of the device, including the mixing of flows in the wet channel. Mathematical model has been presented. The data obtained from the numerical simulation has been presented. On its base the characteristic features of heat and mass exchange processes were shown. The results allow better work on an adaptation of the heat exchanger to Polish climatic conditions.

*Keywords: evaporative cooling, M-cycle, energysaving*

---

\* Prof. dr hab. inż. Sergey Anisimov, mgr inż. Demis Pandelidis, Instytut Klimatyzacji i Ogrzewnictwa, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska.

**Oznaczenia:**

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $c_p$                 | – ciepło właściwe, J/(kg/K)   |
| $\dot{G}$             | – masowy strumień powietrza, kg/s   |
| $t$                   | – temperatura, °C   |
| $\bar{W}$             | – pojemność cieplna, W/K  |
| $x$                   | – zawartość wilgoci, kg/kg (g/kg)   |
| $X$                   | – oś w kierunku ruchu głównego strumienia powietrza   |
| $Y$                   | – oś w kierunku ruchu pomocniczego strumienia powietrza   |
| $Z$                   | – oś prostopadła do osi $X$ i $Y$ , zgodna z kierunkiem ożebrowania   |
| $l$                   | – długość kanału, m   |
| $\bar{X} = X/l_x$     | – odcięta względna  |
| $\bar{Y} = Y/l_y$     | – rzędna względna   |
| $\bar{Z} = Z/h_{rib}$ | – wysokość żebra względna   |
| NTU                   | – liczba jednostek przenikania ciepła   |
| $q$                   | – jednostkowy strumień ciepła, W/m <sup>2</sup>   |
| $\bar{Q}$             | – moc chłodnicza, odniesiona do 1 m <sup>3</sup> wypełnienia, W/m <sup>3</sup>  |
| $i$                   | – entalpia właściwa wilgotnego powietrza, kJ/kg   |
| $\alpha$              | – współczynnik przejmowania ciepła, wyznaczany zgodnie z cytowaną literaturą [2] W/(m <sup>2</sup> K)   |
| $\beta$               | – współczynnik wymiany masy odniesiony do różnicy zawartości wilgoci, kg/(m <sup>2</sup> s), wyznaczany na podstawie stosunku Lewisa, zgodnie z cytowaną literaturą [2] |
| Le                    | – Liczba Lewisa   |
| $\sigma$              | – bezwymiarowy współczynnik uwzględniający nierównomierne zwilżenie powierzchni wypełnienia, na potrzeby wstępnej analizy przyjęto $\sigma = 1$                         |
| $q^\circ$             | – ciepło parowania wody, kJ/kg  |
| $s$                   | – skok ożebrowania  |
| $\delta$              | – grubość, m  |
| $h$                   | – wysokość (w przypadku żebra rozpatrywana jest jako połowa wysokości kanału – symetria ożebrowania; $h_{rib} = h_{kan}/2$ ), m   |
| $m$                   | – współczynnik temperaturowy dla żebra  |
| $\varphi$             | – wilgotność względna, %  |
| $F$                   | – powierzchnia, m <sup>2</sup>  |
| $\lambda$             | – współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m·K)   |

**Indeksy:**

|     |   |
|-----|---|
| $e$ | – wejściowy   |
| $o$ | – wyjściowy   |
| $p$ | – ścianka   |
| '   | – odniesiony do powierzchni wymiany masy                              |
| 1   | – główny strumień powietrza (kanał)                                   |
| 2   | – pomocniczy strumień powietrza (kanał) – część robocza               |
| 3   | – pomocniczy strumień powietrza (kanał) – część wstępna, strona sucha |
| 4   | – pomocniczy strumień powietrza (kanał) – część wstępna, strona mokra |

|         |  |
|---------|--|
| $rib$   | – żebro  |
| $met$   | – warstwa metalu   |
| ”       | – parametr odniesiony do powierzchni ścianki                       |
| *       | – parametry po mieszanii   |
| $b$     | – początkowy   |
| $f$     | – końcowy  |
| $var$   | – zmienny  |
| $const$ | – stały  |
| $K$     | – strumienie powietrza w kanałach mokrych                          |
| $K + 1$ | – strumienie powietrza w kanałach suchych                          |
| $w$     | – woda   |
| $rob$   | – część robocza/odniesiony do części roboczej                      |
| $wst$   | – część wstępna/odniesiony do części wstępnej                      |
| $i, j$  | – zmienne zależne od węzła kalkulacyjnego w danej części (wst/rob) |

## 1. Wstęp

Szerokie zastosowanie konwencjonalnych urządzeń chłodniczych w klimatyzatorach, wykorzystujących układy sprężarkowe łączy się ze znacznymi stratami energetycznymi i, jako dodatkowe źródło zanieczyszczeń cieplnych i chemicznych środowiska naturalnego, stanowi określone niebezpieczeństwo ekologiczne. W związku z tym istotne staje się zadanie częściowej wymiany urządzeń chłodniczych i obniżenie zużycia przez nie energii dzięki zastosowaniu, jako odnawialnego źródła energii, nierównowagi termodynamicznej powietrza atmosferycznego.

Do urządzeń chłodniczych wykorzystujących nierównowagę termodynamiczną powietrza atmosferycznego zalicza się układy oparte na bezpośrednim i pośrednim odparowaniu czynnika chłodniczego (wody) [1]. Ochładzanie powietrza za pomocą parowania jest procesem wymiany ciepła i masy pomiędzy cieczą a gazem, który odbywa się przy przeważającej roli parowania powierzchniowego cieczy. Przy bezpośrednim ochładzaniu powietrza za pomocą parowania (występującym np. w komorach zraszania central wentylacyjnych) występuje kontakt powietrza z wodą, co doprowadza do obniżenia jego temperatury i zwiększenia zawartości wilgoci przy praktycznie niezmienniej entalpii. Z tego powodu wydajność chłodnicza urządzeń wyparnych bezpośrednich (odniesiona do ciepła całkowitego) jest równa zeru. Pośrednie ochłodzenie za pomocą parowania jest procesem, podczas którego powietrze nie ma bezpośredniego kontaktu z wodą, a jego chłodzenie odbywa się przez powierzchnię wymiennika ciepła. W tym przypadku występują dwa strumienie powietrza: pierwszy (nazywany głównym) przepływa przez suchą część wymiennika i obniża swoją temperaturę przy niezmienniej zawartości wilgoci, po czym jest dostarczany do użytkowników pomieszczeń, a drugi (nazywany pomocniczym lub roboczym) płynie kanałem pomocniczym, w którym zachodzi parowanie wody i akumuluje w sobie ciepło od przepływu głównego, po czym jest usuwany na zewnątrz. W takich wymiennikach ciepła proces ochładzania strumienia głównego powietrza odbywa się w suchych kanałach wypełnienia przy obniżającej się entalpii i niezmienniej zawartości wilgoci kosztem parowania wody w przyległych kanałach, wzdłuż których przepływa strumień pomocniczy powietrza. Realizacja pośredniego ochładzania powietrza przez odparowanie (w odróżnieniu od bezpośredniego ochładzania powietrza) daje

możliwość wykorzystania nierównowagi termodynamicznej powietrza atmosferycznego do wytwarzania chłodu, ponadto nowoczesne wymienniki pośrednie cechuje wyższa skuteczność niż jednostki bezpośrednie, co w połączeniu z możliwością lepszej asymilacji zysków wilgoci w pomieszczeniach przez powietrze nawiewane czyni rekuperatory pośrednie bardziej atrakcyjnymi dla inwestorów i inżynierów.

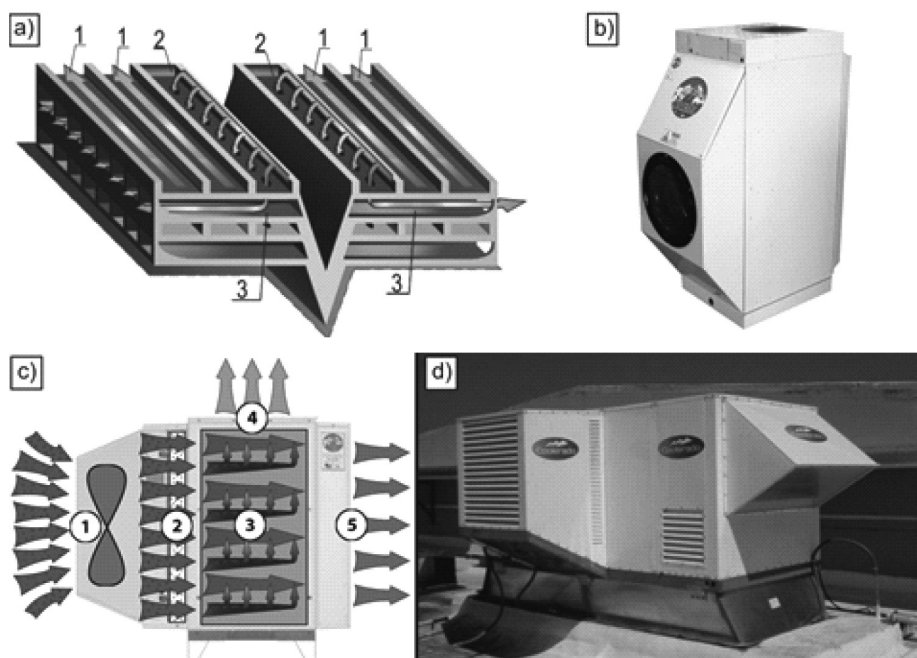
Jednym z najnowszych osiągnięć technologicznych w dziedzinie pośredniego chłodzenia wyparnego jest obieg Maisotsenki (ang. Maisotsenko-cycle, M-cycle), opierający się na mieszanym schemacie przepływu powietrza, co pozwala obniżyć temperaturę powietrza poniżej temperatury termometru mokrego (jest to niewykonalne w urządzeniach bezpośrednich). Unikalne własności M-obiegu czynią go niezwykle atrakcyjnym dla państw takich jak Polska, gdzie typowe pośrednie urządzenia wyparne nie znajdują powszechnego zastosowania ze względu na stosunkowo wysoką wilgotność klimatu. Sukces jednostki na terenie Stanów Zjednoczonych, a także otwarcie linii produkcyjnej na terenie Unii Europejskiej (Holandia) świadczy o wartości M-obiegu jako nowoczesnego, niskoenergetycznego systemu chłodniczego. Urządzenia klimatyzacyjne wyposażone w wymiennik Maisotsenki są produkowane i sprzedawane przez amerykańską korporację Coolerado™, która z racji ogromnego zainteresowania produktem przez rynek, w krótkim czasie zmuszona była zwiększyć produkcję jednostek z 5000 egzemplarzy na rok do 50 000 egzemplarzy na rok pod koniec 2010 roku. Firma zdobyła ponadto liczne nagrody, min. Green Business of the Year przyznawaną przez Izbę Gospodarczą miasta Denver, Best of What's New magazynu Popular Science, a także nagrodę R&D 100, w USA nazywaną „Oskarem innowacji” (wśród pozostałych laureatów znajdowały się takie firmy jak Mitsubishi, Lockheed Martin czy General Electric).

Wraz z wzrostem zainteresowania M-obiegiem dla Coolerado Corp. istotne stało się zwiększanie efektywności wymienników, tak by proces wymiany ciepła i masy przebiegał w sposób optymalny, przy minimalnym zużyciu wody i niskich stratach ciśnienia po stronie powietrza. W tym celu rozpoczęła współpracę z naukowcami na terenie całego świata, m.in. z Gas Technology Institute w Chicago. Korporacja nawiązała również współpracę z Instytutem Klimatyzacji i Ogrzewnictwa na Politechnice Wrocławskiej, reprezentowanej przez autorów artykułu. Sergey Anisimov i Demis Pandelidis wskazali, że najskuteczniejszą metodą optymalizacji wymienników wyparnych są wielowariantowe symulacje komputerowe opracowane na podstawie modelu matematycznego. Metody eksperymentalne są mniej efektywne z powodu niedokładności przyrządów pomiarowych oraz z powodu niewielkich rozmiarów wymiennika uniemożliwiających poprawny odczyt parametrów termodynamicznych wypełnienia. Model i wstępne wyniki zostały przez zarząd korporacji uznane za bardzo wiarygodne, dlatego 6 czerwca 2012 roku Politechnika Wroclawska i Idalex Technologies (właściciel Coolerado) zawarli porozumienie o współpracy w działaniach badawczych. W niniejszym artykule przedstawione zostaną wstępne wyniki uzyskane z modelu matematycznego.

### 1.1. Zasada działania obiegu Maisotsenki

Zasada działania rekuperatora z M-obiegiem (rys. 1a): powietrze po wejściu do wymiennika jest dzielone na 2 części (1 – przepływ główny, 2 – przepływ pomocniczy). Strumień główny płynie kanałami suchymi, gdzie jest ochładzany, a następnie dostarczany do użytkowników pomieszczeń. Przepływ pomocniczy płynie suchym kanałem pomocniczym, w którym przez otwory w ścianie dostaje się do kanału mokrego (3 – przepływ pomocniczy w kanałach mokrych), wypełnionego wilgotnym materiałem porowatym, gdzie realizowane

jest chłodzenie wyparne. Część mokra wymiennika oddzielona jest od suchej cienką warstwą nieprzepuszczającego wody metalu. Suchy kanał pomocniczy pozwala na wstępne obniżenie temperatury strumienia roboczego. Strumień powietrza przedostając się do części mokrej jest ochładzany w coraz większym stopniu, podobnie jak w wymienniku regeneracyjnym [1]. Strumień pomocniczy w kanałach mokrych przepływa krzyżowo w stosunku do głównego. Przykładem urządzenia wykorzystującej rekuperator z M-obiegiem jest jednostka M-30 firmy Coolerado™[3] (rys. 1b, c). Zasada działania urządzenia (rys. 1b): wentylator (1) zasysa powietrze zewnętrzne, które przechodzi przez filtr (2), następnie dostaje się do wymiennika (3), strumień główny (5) dostarczany jest do pomieszczeń, a pomocniczy (4) usuwany na zewnątrz.



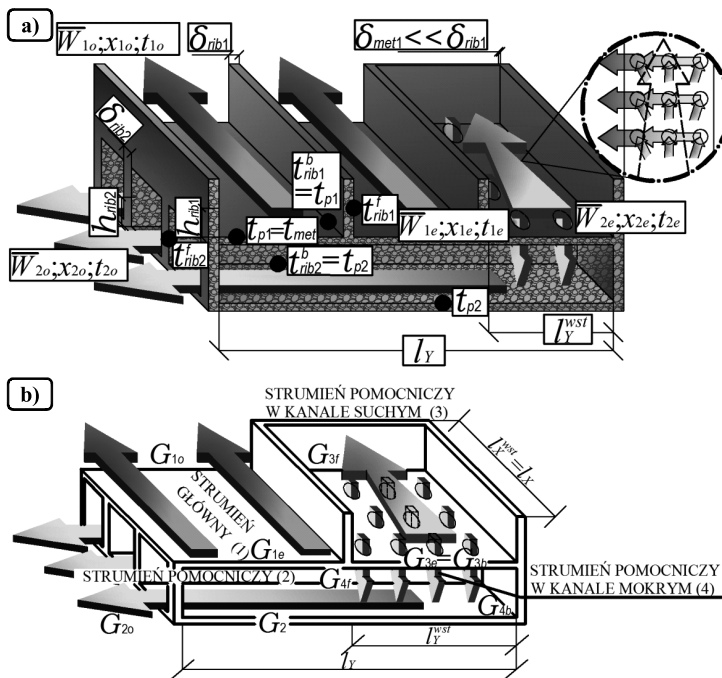
Rys. 1. Wymiennik z M-obiegiem a) wygląd wymiennika b) samodzielna jednostka M-30 oparta na rekuperatorze z M-obiegiem; c) zasada działania jednostki M-30; d) centrala wentylacyjna H-80 firmy Coolerado wykorzystująca wymiennik z M-obiegiem

Fig. 1. M-cycle exchanger

## 2. Analiza teoretyczna cech charakterystycznych konstrukcji jednostki

Tworzenie modelu matematycznego M-obiegu wymaga rozwiązania szeregu problemów, wynikających z niestandardowego schematu przepływu powietrza, dlatego konieczna staje się dokładna analiza teoretyczna zagadnienia. Autorzy poddali szczegółowej analizie omawiany rekuperator ze szczególnym naciskiem na kwestię rozwiązania algorytmicznego układu równań różniczkowych, opisujących procesy wymiany ciepła i masy przy zmiennym schemacie przepływu powietrza w kanałach wypełnienia.

Wymiennik z obiegiem Maisotsenki może być rozpatrywany jako dwie zasadnicze części (rys. 2): pierwsza odpowiada za ochłodzenie strumienia głównego przed dostarczeniem do użytkowników pomieszczeń (cz. robocza – rys. 2a, b), natomiast druga część odpowiada za wstępną obróbkę termiczną strumienia pomocniczego przed dostaniem się do mokrych kanałów (cz. wstępna – rys. 2a, b). Taki schemat przepływu umożliwi obniżenie temperatury powietrza pomocniczego przed realizacją właściwego chłodzenia wyparnego w roboczej części urządzenia. Podstawowym problemem, który musi być rozwiązany przy tworzeniu modelu matematycznego M-obiegu, jest zapis algorytmiczny procesów mieszania strumienia pomocniczego we wstępnej części wymiennika. Autorzy opracowali omawiany zapis, opierając się na równaniach różniczkowych cząstkowych bilansu ciepła i masy oraz na algebraicznych równaniach mieszania dwóch strumieni wilgotnego powietrza.



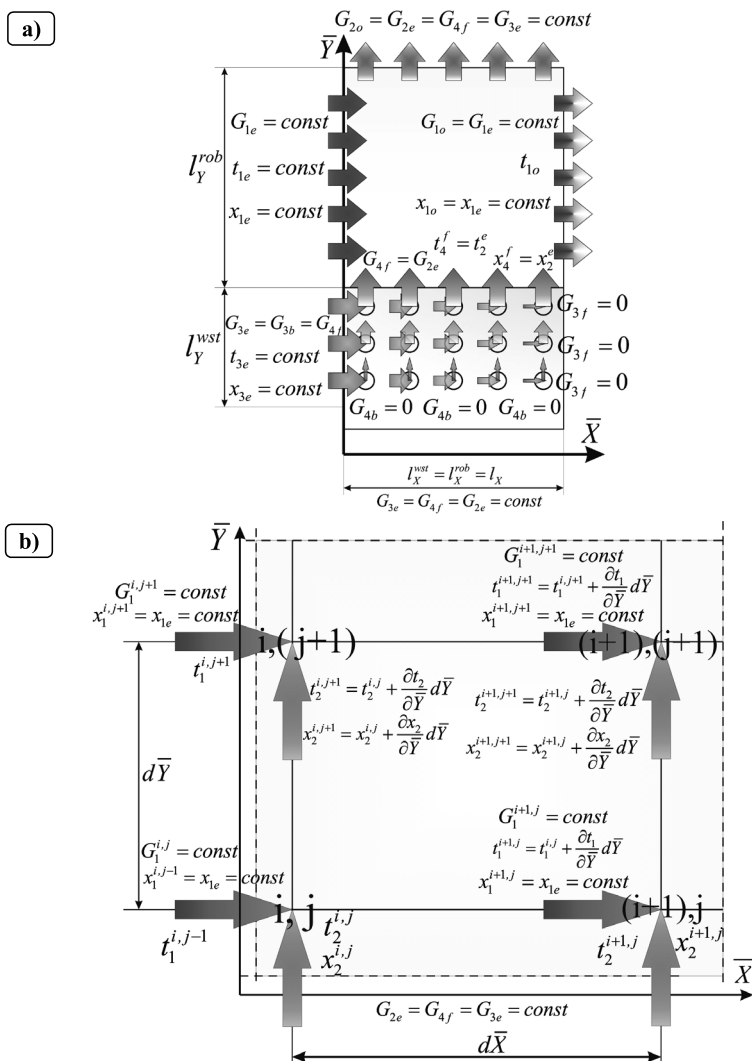
Rys. 2. Charakterystyka wymiennika z M-obiegiem: a) struktura wypełnienia z oznaczeniami b) podział jednostki na części zasadnicze w odniesieniu do wstępnego ochładzania strumienia pomocniczego

Fig. 2. M-cycle heat exchanger characteristics

By zrozumieć procesy zachodzące w części wstępnej, należy rozpatrzeć pojedyncze komórki algorytmu kalkulacyjnego. W celu uproszczenia analizy strumień pomocniczy opisywany będzie jako trzy liczbowo równe przepływy: strumień pomocniczy płynący w kanale suchym części wstępnej (3), strumień płynący w kanale mokrym części wstępnej (4) oraz strumień płynący w części roboczej jednostki (2), wymieniający ciepło z przepływem głównym 1 (rys. 2b). Równania bilansu dla przepływu 3 zawierają tylko bilans ciepły, podczas gdy dla przepływów 2 i 4 zawierają jednoczesny bilans ciepła i masy. Jednostkowe części



strumienia 3 ( $dG_3$ ) dostają się do mokrej części poprzez perforowane otwory (rys. 3a). Długość strefy mieszania wynosi  $l_Y^{wst}$ . Strumień masowy 4 zwiększa się zgodnie z kierunkiem przepływu (wzdłuż osi  $Y$ ), aż do osiągnięcia wartości maksymalnej po osiągnięciu długości  $l_Y^{wst}$ . Przepływ 3 zmniejsza się zgodnie z kierunkiem przepływu (wzdłuż osi  $X$ ), aż do całkowitego zaniku (cały strumień przedostaje się do części mokrej). Wartość końcowa przepływu 3 jest równa wartości początkowej przepływu 4 i wynosi 0.



Rys. 3. Założenia do modelowania wymiennika z M-obiegiem: a) widok ogólny założonego podziału strumieni b) pojedyncza komórka obliczeniowa dla strefy roboczej

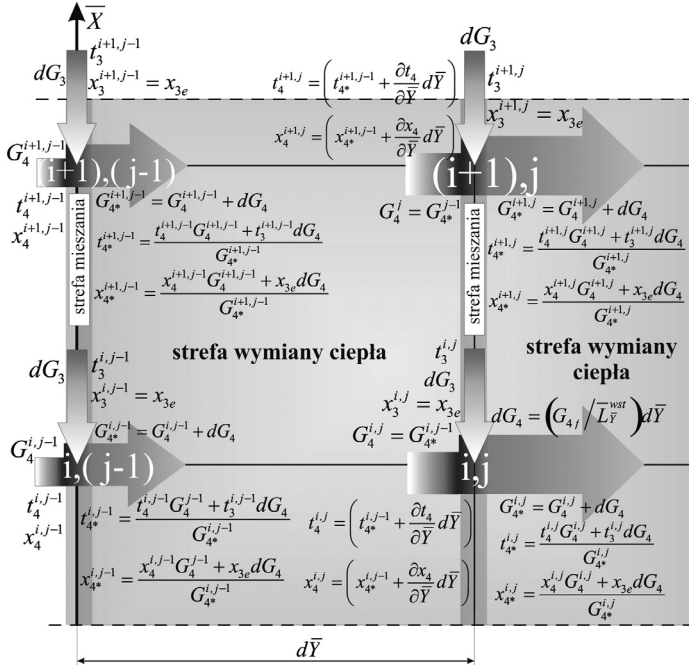
Fig. 3. M-cycle heat exchanger mathematical model assumptions

Na rysunku 3b zilustrowano przepływ strumienia ciepła pomiędzy strumieniem głównym 1 i pomocniczym 2 w pojedynczej komórce algorytmu kalkulacyjnego. Komórka posiada 4 węzły obliczeniowe:  $(i, j)$ ;  $(i+1, j)$ ;  $(i, j+1)$ ;  $(i+1, j+1)$ . Jednostkowe składowe strumienia 2 płyną równoległe do osi  $\bar{Y}$ , od strumienia 1 oddziela je nieprzepuszczająca wodę folia metalowa. Parametry początkowe jednostkowych przepływów są opisywane przez temperaturę:  $t_2^{i+1,j}$ ;  $t_2^{i,j}$  oraz zawartość wilgoci  $x_2^{i+1,j}$ ;  $x_2^{i,j}$ . Parametry (temperatura i zawartość wilgoci) elementarnej składowej przepływu głównego 1 w pierwszym węźle kalkulacyjnym  $(i, j)$  mają wartości  $t_1^{i,j}$  oraz  $x_1^{i,j}$ . Przepływy elementarne wymieniają ciepło dokładnie w węźle  $i, j$ . Strumień 1 oddaje ciepło do kanału mokrego, co powoduje zmianę początkowej wartości temperatury o jednostkową wartość  $\frac{\partial t_1}{\partial \bar{X}} d\bar{X}$ . Zatem wartość końcowa temperatury, będąca wartością początkową w następnym węźle obliczeniowym  $(i, j+1)$  będzie równa  $t_1^{i+1,j} = t_1^{i,j} + \frac{\partial t_1}{\partial \bar{X}} d\bar{X}$  (rys. 3b). Po kolejnym kroku temperatura znowu ulegnie zmianie o elementarną wartość i tak dalej. Cykl będzie powtarzany do zakończenia procesu kalkulacyjnego. Ponieważ przepływ główny wymienia tylko ciepło jawne, jego zawartość wilgoci jest stała podczas całego procesu ( $x_1^{(i,j)} = x_1^{(i+1,j)} = \text{const} = x_1 e$ ).

Ciepło dostarczone od strumienia 1 powoduje, w zależności od strefy aktywnej wymiany ciepła i masy [1, 4, 5, 9–11], odparowanie cieczy (w tym przypadku temperatura strumienia 2 obniża się) lub odparowanie cieczy przy jednoczesnym podgrzaniu strumienia 2. W każdym z przypadków temperatura i zawartość wilgoci strumienia pomocniczego zmieniają się. Pomiedzy kolejnymi węzłami obliczeniowymi  $(i, j$  oraz  $i+1, j)$  zawartość wilgoci zwiększa się o jednostkową wartość  $\frac{\partial x_2}{\partial \bar{Y}} d\bar{Y}$ , zatem jej końcowa wartość wynosi  $x_2^{i,j+1} = x_2^{i,j} + \frac{\partial x_2}{\partial \bar{Y}} d\bar{Y}$  (rys. 3b). W tym samym czasie temperatura ulega zmianie o elementarną wartość  $\frac{\partial t_2}{\partial \bar{Y}} d\bar{Y}$  końcowa wartość jest równa  $t_2^{(i,j+1)} = t_2^{i,j} + \frac{\partial t_2}{\partial \bar{Y}} d\bar{Y}$ . Końcowe wartości  $t_2^{i,j+1}$  oraz  $x_2^{i,j+1}$  stają się parametrami wejściowymi w następnym węźle kalkulacyjnym  $(i, j+1)$ , po którym zawartość wilgoci i temperatura zmieniają się o elementarne wartości  $\frac{\partial x_2}{\partial \bar{Y}} d\bar{Y}$ ,  $\frac{\partial t_2}{\partial \bar{Y}} d\bar{Y}$  i tak dalej. Końcowe parametry po każdym z węzłów w siatce obliczeniowej stają się zawsze wartościami wejściowymi w następnym kroku kalkulacyjnym (rys. 3b).

Procesy zachodzące we wstępnej części wymiennika są bardziej skomplikowane niż omówione wyżej procesy w części roboczej, gdyż występuje tu dodatkowo mieszanie się strumienia powietrza z kanału suchego z powietrzem w kanale mokrym. Z tego powodu osobnej analizie zostanie poddana część mokra i część sucha.

Na rysunku 4 przedstawiono mokrą część wymiennika, w której zgodnie z kierunkiem osi  $\bar{Y}$  płyną elementarne składowe strumienia 4. Początkowe parametry jednostkowych przepływów przed pierwszymi węzłami obliczeniowymi  $(i, j-1)$  i  $(i+1, j-1)$  opisywane są przez temperaturę  $t_4^{i,j-1}$ ;  $t_4^{i+1,j-1}$ , zawartość wilgoci  $x_4^{i,j-1}$ ;  $x_4^{i+1,j-1}$ . Ilość przepływającego powietrza przed węzłami kalkulacyjnymi opisywana jest przez strumienie masowe:  $G_4^{i,j-1}$  i  $G_4^{i+1,j-1}$  (rys. 4). Należy pamiętać, że początkowa wartość strumienia 4 wynosi 0 – proces obliczeniowy zaczyna się w momencie dostarczenia pierwszych elementarnych części przepływu 3 do kanału mokrego.



Rys. 4. Pojedyncza komórka obliczeniowa – część wstępna, kanał mokry

Fig. 4. Single calculation cell – initial part of the exchanger, wet channel

Do pierwszego rozważanego węzła  $(i, j-1)$  – rys. 4) dostarczane są dwa elementarne strumienie: jednostkowa składowa  $G_4^{i, j-1}$  oraz jednostkowa składowa strumienia 3 z kanału suchego ( $dG_3$ ), która dostała się do części mokrej przez perforowany otwór. Parametry wejściowe przepływu  $dG_3$  opisują temperatura i zawartość wilgoci:  $t_3^{i, j-1}$  oraz  $x_3^{i, j-1} = x_{3e}$  (zawartość wilgoci strumienia 3 jest niezmienna i równa wartości początkowej). Dokładnie w węźle  $i, j-1$  przepływy masowe mieszają się (strefa mieszania – rys. 4). Parametry wyjściowe strumienia 4\* (indeks \* oznacza parametry po mieszanii) można wyznaczyć proporcjonalnie:  $t_4^{i, j-1} = \frac{t_4^{i, j-1} G_4^{i, j-1} + t_3^{i, j-1} dG_3}{G_4^{i, j-1}}$ , gdzie  $dG_4 = -dG_3$  jest elementarną składową przepływu 3. Analogicznie wyznaczana jest zawartość wilgoci:  $x_4^{i, j-1} = \frac{x_4^{i, j-1} G_4^{i, j-1} + x_3^{i, j-1} dG_3}{G_4^{i, j-1}}$ . Strumień masowy zwiększył się i wynosi:  $G_4^{i, j-1} = G_4^{(i, j-1)} + dG_4$  (rys. 4). Analogicznie wyznaczane są parametry elementarnego strumienia 4\* w węźle  $i+1, j-1$ :

$$t_4^{i+1, j-1} = \frac{t_4^{i+1, j-1} G_4^{i+1, j-1} + t_3^{i+1, j-1} dG_3}{G_4^{i+1, j-1}};$$

$$x_{4*}^{i+1,j-1} = \frac{x_4^{i+1,j-1} G_4^{i+1,j-1} + x_3^{i+1,j-1} dG_4}{G_{4*}^{i+1,j-1}}$$

Przed następnym krokiem obliczeniowym strumienie 4 i 3 wymieniają ciepło. Proces zachodzi tak, jak w omówionej części roboczej wymiennika. Temperatura jednostkowego przepływu 4 ulega zmianie o elementarną wartość  $\frac{\partial t_4}{\partial \bar{Y}} d\bar{Y}$ , a zawartość wilgoci wzrasta o wartość  $\frac{\partial x_4}{\partial \bar{Y}} d\bar{Y}$  (strefa wymiany ciepła – rys. 4). Zatem końcowe parametry, będące jednocześnie wartościami początkowymi w węźle  $i, j$  oraz  $i+1, j$  wynoszą:

$$t_4^{i,j} = \left( t_{4*}^{i,j-1} + \frac{\partial t_4}{\partial \bar{Y}} d\bar{Y} \right) \text{ i } x_4^{i,j} = \left( x_{4*}^{i,j-1} + \frac{\partial x_4}{\partial \bar{Y}} d\bar{Y} \right)$$

$$t_4^{i+1,j} = \left( t_{4*}^{i+1,j-1} + \frac{\partial t_4}{\partial \bar{Y}} d\bar{Y} \right) \text{ i } x_4^{i+1,j} = \left( x_{4*}^{i+1,j-1} + \frac{\partial x_4}{\partial \bar{Y}} d\bar{Y} \right)$$

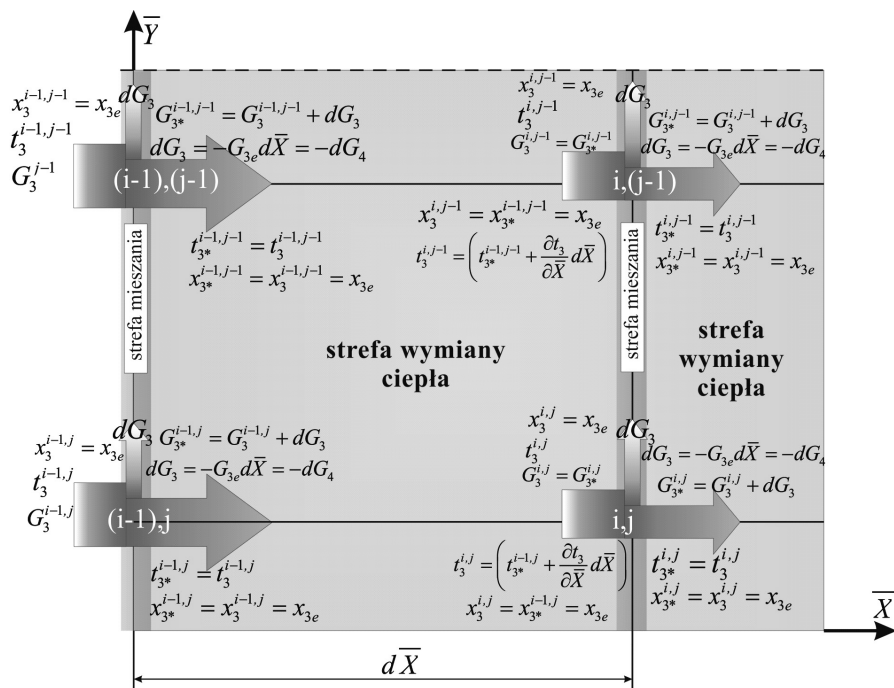
W kolejnym rozpatrywanym węźle  $(i, j)$ , jednostkowy strumień 4 znowu miesza się z jednostkową częścią przepływu 3 ( $dG_3$  o parametrach  $t_3^{j,i}$  i  $x_3^{j,i} = x_{3e}$ ), co powoduje proporcjonalną zmianę temperatury i wilgotności oraz zwiększenie przepływu masowego. Następnie, przed kolejnym węzłem, przepływy 3 i 4 wymieniają ciepło i tak dalej. Parametry w pozostałych węzłach siatki obliczeniowej wyznaczane są analogicznie. Końcowa wartość strumienia 4 jest równa wartości przepływu pomocniczego na wejściu i na wyjściu z wymiennika ( $G_{4f} = G_{2e} = G_{3e} = G_{2o} = \text{const}$ ). Końcowe parametry przepływu 4 ( $G_{4f}$ ) są jednocześnie wejściowymi wartościami dla strumienia 2 ( $G_{2e}$ ) w części roboczej (rys. 3a).

Procesy występujące po suchej stronie części roboczej wymiennika (rys. 5) są mniej skomplikowane, gdyż zawartość wilgoci strumienia 3 jest niezmienna przez cały czas. Na rysunku 5 zaprezentowano pojedynczą komórkę obliczeniową posiadającą 4 węzły kalkulacyjne  $(i-1, j-1; i-1, j; i, j; i, j-1)$ .

Elementarna składowa przepływu 3 w pierwszym rozpatrywanym węźle  $(i-1, j)$  na wejściu jest opisywana przez parametry  $t_3^{i-1,j}$  oraz  $x_3^{i-1,j}$ . Elementarny przepływ masowy ma wartość  $G_3^{i-1,j}$ . Dokładnie w punkcie  $i-1, j$  elementarna część strumienia 3 ( $dG_3$  o parametrach  $t_3^{i-1,j}$  i  $x_3^{i-1,j}$ ) oddziela się i dostaje się przez perforowany otwór do mokrego kanału, gdzie miesza się ze strumieniem 4 (strefa mieszania – rys. 5). Przepływ 3 zmniejsza się o wartość  $dG_3 = -dG_4$ . Założono brak dodatkowej wymiany ciepła w momencie mieszania strumieni:  $t_3^{(i-1,j)} = t_{(3*)}^{(i-1,j)}$ , zawartość wilgoci również nie ulega zmianie  $x_3^{i-1,j} = x_{(3*)}^{(i-1,j)}$ . Przed następnym węzłem obliczeniowym  $(i, j)$  następuje wymiana ciepła pomiędzy przepływem 3 i 4, przez co temperatura strumienia 3 zmniejsza się o jednostkową wartość  $\frac{\partial t_3}{\partial \bar{X}} d\bar{X}$  (strefa wymiany ciepła – rys. 5). Zawartość wilgoci nie zmienia się – procesy zachodzą bez kontaktu z wodą ( $x_{3e} = x_3^{(i,j)} = x_{(3*)}^{i-1,j} = \text{const}$ ). Końcowa wartość temperatury przepływu 3 przed następnym krokiem kalkulacyjnym wynosi zatem  $t_3^{i,j} = t_3^{i-1,j} + \frac{\partial t_3}{\partial \bar{X}} d\bar{X}$ . Dokładnie w punkcie  $i, j$  jednostkowa część strumienia zostaje odłączona i dostarczona do kanału mo-

krego gdzie miesza się z przepływem 4 i tak dalej. Końcowe parametry po każdym kroku obliczeniowym będą zawsze parametrami wejściowymi w następnym kroku. Końcowa wartość przepływu 3 wynosi 0 – cały strumień dostaje się do kanału mokrego.

Przedstawione powyżej rozwiązanie algorytmiczne pozwala sformułować ostateczną postać równań modelu matematycznego z adekwatnymi warunkami brzegowymi.



Rys. 5. Pojedyncza komórka obliczeniowa – część wstępna, kanał suchy

Fig. 5. Single calculation cell – initial part of the exchanger, dry channel

### 3. Równania modelu matematycznego

Równania rozważanego  $\varepsilon$ -NTU-model, opisujące procesy wymiany ciepła i masy w kanałach wypełnienia M-obiegu realizowane są w ortogonalnym układzie współrzędnych. Procesy opisywane są za pomocą cząstkowych równań różniczkowych bilansu ciepła i masy dla oddzielnych strumieni powietrza (1, 2, 3 oraz 4). Zgodnie z założeniami przedstawionymi w poprzednim podpunkcie, stwierdzono, że równania opisujące część wstępną nie mogą opisywać części roboczej i na odwrót. Wynika to z faktu zmiennej ilości powietrza dla przepływu 3 i 4, a co za tym idzie, zmiennej liczby jednostek przenikania ciepła NTU.

– Równania części roboczej:

$$\frac{\partial t_1}{\partial \bar{X}} = \text{NTU}''_{\text{const}} (t_{p1} - t_1) \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib1}}}{s_{\text{rib1}}} \right) + \frac{2}{m_{\text{rib1}} s_{\text{rib1}}} \text{th}(m_{\text{rib1}} h_{\text{rib1}}) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial Y} = \text{NTU}_{2\text{const}}'' \left( \frac{1}{\bar{l}_Y^{\text{rob}}} \right) \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib}2}}{s_{\text{rib}2}} \right) (t'_{p2} - t_2) \left[ 1 + \left( \frac{\sigma_p}{\text{Le}} \right)_2 \left( \frac{c_{pw}}{c_p} \right)_2 (x'_{p2} - x_2) \right] + \text{NTU}_{2\text{const}}'' \left( \frac{1}{\bar{l}_Y^{\text{rob}}} \right) \frac{2h_{\text{rib}2}}{s_{\text{rib}2}} \left[ \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} (t'_{\text{rib}2} - t_2) d\bar{Z}_2 + \left( \frac{1}{\text{Le}} \right)_2 \left( \frac{c_{pw}}{c_p} \right)_2 \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} \sigma_{\text{rib}2} (x'_{\text{rib}2} - x_2) (t'_{\text{rib}2} - t_2) d\bar{Z}_2 \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial Y} = \text{NTU}_{2\text{const}}'' \left( \frac{1}{\bar{l}_Y^{\text{rob}}} \right) \left( \frac{1}{\text{Le}} \right)_2 \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib}2}}{s_{\text{rib}2}} \right) \sigma_{p2} (x'_{p2} - x_2) + \frac{2h_{\text{rib}2}}{s_{\text{rib}2}} \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} \sigma_{\text{rib}2} (x'_{\text{rib}2} - x_2) d\bar{Z}_2 \right] \quad (3)$$

– Równania części wstępnej:

$$\frac{\partial t_3}{\partial X} = \text{NTU}_{3\text{var}}'' (t_{p3} - t_3) \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib}3}}{s_{\text{rib}3}} \right) + \frac{2}{m_{\text{rib}3} s_{\text{rib}3}} \text{th}(m_{\text{rib}3} h_{\text{rib}3}) \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial t_4}{\partial Y} = \text{NTU}_{4\text{var}}'' \left( \frac{1}{\bar{l}_Y^{\text{wst}}} \right) \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib}4}}{s_{\text{rib}4}} \right) (t'_{p4} - t_4) \left[ 1 + \left( \frac{\sigma_p}{\text{Le}} \right)_4 \left( \frac{c_{pw}}{c_p} \right)_4 (x'_{p4} - x_4) \right] + \text{NTU}_{4\text{var}}'' \left( \frac{1}{\bar{l}_Y^{\text{wst}}} \right) \frac{2h_{\text{rib}4}}{s_{\text{rib}4}} \left[ \int_{\bar{Z}_4=0}^{\bar{Z}_4=1} (t'_{\text{rib}4} - t_4) d\bar{Z}_4 + \left( \frac{1}{\text{Le}} \right)_4 \left( \frac{c_{pw}}{c_p} \right)_4 \int_{\bar{Z}_4=0}^{\bar{Z}_4=1} \sigma_{\text{rib}4} (x'_{\text{rib}4} - x_4) (t'_{\text{rib}4} - t_4) d\bar{Z}_4 \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial x_4}{\partial Y} = \text{NTU}_{4\text{var}}'' \left( \frac{1}{\bar{l}_Y^{\text{wst}}} \right) \left( \frac{1}{\text{Le}} \right)_4 \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib}4}}{s_{\text{rib}4}} \right) \sigma_{p4} (x'_{p4} - x_4) + \frac{2h_{\text{rib}4}}{s_{\text{rib}4}} \int_{\bar{Z}_4=0}^{\bar{Z}_4=1} \sigma_{\text{rib}4} (x'_{\text{rib}4} - x_4) d\bar{Z}_4 \right] \quad (6)$$

– Oznaczenia:

$$\bar{X} = X/l_X; \quad l_X^{\text{wst}} = l_X^{\text{rob}} = l_X; \quad \bar{l}_X^{\text{wst}} = l_X^{\text{wst}}/l_X = 1,0; \quad \bar{l}_X^{\text{rob}} = l_X^{\text{rob}}/l_X = 1,0; \quad \bar{Y} = Y/l_Y; \quad \bar{l}_Y^{\text{wst}} = l_Y^{\text{wst}}/l_Y; \quad \bar{l}_Y^{\text{rob}} = l_Y^{\text{rob}}/l_Y; \quad (l_Y^{\text{wst}} + l_Y^{\text{rob}}) = l_Y; \quad (\bar{l}_Y^{\text{wst}} + \bar{l}_Y^{\text{rob}}) = 1,0; \quad \text{NTU}_j = [\alpha F / (Gc_p)]_j$$

Gdzie oś  $\bar{X}$  skierowana jest zgodnie z kierunkiem przepływu głównego 1 i roboczego 3, a oś  $\bar{Y}$  zgodnie ze strumieniami 2 i 4. Łatwo można zauważyć, że pary równań opisujące procesy wymiany ciepła i masy dla przepływów 1 i 3 oraz 2 i 4 są niemalże identyczne: różni ich tylko zmienna wartość liczby NTU oraz długość sekcji w kierunku osi  $\bar{Y}$ , w której odbywają się procesy wymiany ciepła i masy. W przypadku strumieni w części wstępnej NTU zmienia się z powodu zwiększającego bądź zmniejszającego się strumienia powietrza, natomiast w przypadku części roboczej jego wartość jest stała. W celu skrócenia zapisu, w dalszej części rozdziału będą przedstawione tylko dwa typy równań: opisujące procesy w kanałach suchych oraz opisujące procesy w kanałach wilgotnych. Strumienie 1 i 3 (kanały suche) będą oznaczane symbolem  $K$ , natomiast przepływy 2 i 4 (kanały mokre) będą oznaczane symbolem  $K+1$ . Należy pamiętać, że NTU jest zmienne dla przepływu 3 i 4 oraz stałe dla 1 i 2 oraz długości sekcji wstępnej i roboczej są różne.



Matematyczny model opisujący M-obieg opisują ponadto równania:

- Równanie opisujące warunek ciągłości przepływu energii na powierzchni ścianek kanałów:

$$\left( \frac{\lambda_p}{\delta_p} \right) \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib}K}}{s_{\text{rib}K}} \right) (t_{pK} - t'_{pK+1}) + \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib}K+1}}{s_{\text{rib}K+1}} \right) \left[ \alpha_{K+1} (t_{K+1} - t'_{pK+1}) + \left( \frac{\alpha}{c_p \text{Le}} \right)_{K+1} \sigma_{pK+1} (x_{K+1} - x'_{pK+1}) q_{pK+1}^o \right] = 0 \quad (7)$$

- Równanie bilansu na powierzchni wypełnienia kanałów z uwzględnieniem ożebrowania:

$$\left( \frac{W_K}{W_{K+1}} \right) \frac{\partial t_K}{\partial \bar{X}} + \bar{L}_{K+1} \left[ \frac{\partial t_{K+1}}{\partial \bar{Y}} + \left( \frac{q_p^o}{c_p} \right)_{K+1} \frac{\partial x_{K+1}}{\partial \bar{Y}} \right] + \Psi_{K+1}(t_{K+1}, x_{K+1}) + \Omega_{K+1}(q_{pK+1}^o, q_{\text{rib}K+1}^o) = 0 \quad (8)$$

- Gdzie:

$$K = 1, 3$$

$$\bar{L}_2 = \bar{L}_Y^{\text{rob}}; \bar{L}_4 = \bar{L}_Y^{\text{wst}}$$

$\Psi_{K+1}(t_{K+1}, x_{K+1})$  – poprawka uwzględniająca różne temperatury powierzchni ścianki  $t'_{pK+1}$  i powierzchni żebra  $t'_{\text{rib}K+1}$  w kanale powietrza pomocniczego, gdzie NTU jest stałe (const) dla strumienia 2 oraz zmienne (var) dla 4:

$$\begin{aligned} \Psi_{K+1}(t_{K+1}, x_{K+1}) = & \\ & - \left[ \text{NTU}_{K+1}^{\text{const/var}} \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib}K+1}}{s_{\text{rib}K+1}} \right) (t'_{pK+1} - t_{K+1}) \left( \frac{\sigma_p}{\text{Le}} \right)_{K+1} \left( \frac{c_{pw}}{c_p} \right)_{K+1} (x'_{pK+1} - x_{K+1}) \right] \\ & - \left[ \text{NTU}_{K+1}^{\text{const/var}} \frac{2h_{\text{rib}K+1}}{s_{\text{rib}K+1}} \left( \frac{1}{\text{Le}} \right)_{K+1} \left( \frac{c_{pw}}{c_p} \right)_{K+1} \int_{\bar{Z}_{K+1}=0}^{\bar{Z}_{K+1}=1} \sigma_{\text{rib}K+1} (x'_{\text{rib}K+1} - x_{K+1}) (t'_{\text{rib}K+1} - t_{K+1}) d\bar{Z}_{K+1} \right] \approx 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$\Omega_{K+1}(q_{pK+1}^o, q_{\text{rib}K+1}^o)$  – poprawka uwzględniająca różny charakter procesu parowania wody na powierzchni ścianki kanału i powierzchni żebra (w tym różne wartości ciepła parowania przy różnych temperaturach ścianki i żebra), wynikająca z przekształcenia równań różniczkowych wymiany ciepła i masy, gdzie NTU jest stałe (const) dla strumienia 2 oraz zmienne (var) dla 4:

$$\begin{aligned} \Omega_{K+1}(q_{pK+1}^o, q_{\text{rib}K+1}^o) = & \\ & \left[ \text{NTU}_{K+1}^{\text{const/var}} \left( \frac{1}{c_p \text{Le}} \right)_{K+1} \frac{2h_{\text{rib}K+1}}{s_{\text{rib}K+1}} \int_{\bar{Z}_{K+1}=0}^{\bar{Z}_{K+1}=1} q_{\text{rib}K+1}^o \sigma_{\text{rib}K+1} (x'_{\text{rib}K+1} - x_{K+1}) d\bar{Z}_{K+1} \right] - \\ & - \left[ \text{NTU}_{K+1}^{\text{const/var}} \left( \frac{q_p^o}{c_p \text{Le}} \right)_{K+1} \frac{2h_{\text{rib}K+1}}{s_{\text{rib}K+1}} \int_{\bar{Z}_{K+1}=0}^{\bar{Z}_{K+1}=1} \sigma_{\text{rib}K+1} (x'_{\text{rib}K+1} - x_{K+1}) d\bar{Z}_{K+1} \right] \approx 0 \end{aligned} \quad (10)$$

By uzyskać jednoznaczne rozwiązanie układu równań, system uzupełniany jest o warunki, określające parametry termodynamiczne strumieni powietrza na wejściu do wymiennika:

– Dla przepływu głównego:

$$t_1 \left| \begin{array}{l} = t_{1e} = t_{3e} \\ \bar{X} = 0 \\ \bar{Y} = \bar{l}_y^{\text{wst}} \div 1,0 \end{array} \right. \quad x_1 \left| \begin{array}{l} = x_{1e} = \text{const} \\ \bar{X} = 0 \div 1 \\ \bar{Y} = \bar{l}_y^{\text{wst}} \div 1,0 \end{array} \right.$$

– Dla przepływów pomocniczych:

$$t_{2e} \left| \begin{array}{l} = t_{4f} \\ \bar{X} = 0 \div 1,0 \\ \bar{Y} = \bar{l}_y^{\text{wst}} \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} \bar{X} = 0 \div 1,0 \\ \bar{Y} = \bar{l}_y^{\text{wst}} \end{array} \right. \quad x_{2e} \left| \begin{array}{l} = x_{4f} \\ \bar{X} = 0 \div 1,0 \\ \bar{Y} = \bar{l}_y^{\text{wst}} \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} \bar{X} = 0 \div 1,0 \\ \bar{Y} = \bar{l}_y^{\text{wst}} \end{array} \right.$$

$$t_3 \left| \begin{array}{l} = t_{3e} \\ \bar{X} = 0 \\ \bar{Y} = 0 \div \bar{l}_y^{\text{wst}} \end{array} \right. \quad x_3 \left| \begin{array}{l} = x_{3e} = \text{const} \\ \bar{X} = 0 \div 1 \\ \bar{Y} = 0 \div \bar{l}_y^{\text{wst}} \end{array} \right. \quad t_4 \left| \begin{array}{l} = t_3 \\ \bar{X} = 0 \div 1,0 \\ \bar{Y} = 0 \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} \bar{X} = 0 \div 1,0 \\ \bar{Y} = 0 \end{array} \right.$$

$$x_4 \left| \begin{array}{l} = x_3 \\ \bar{X} = 0 \div 1,0 \\ \bar{Y} = 0 \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} \bar{X} = 0 \div 1,0 \\ \bar{Y} = 0 \end{array} \right. \quad = x_{3e} = \text{const}$$

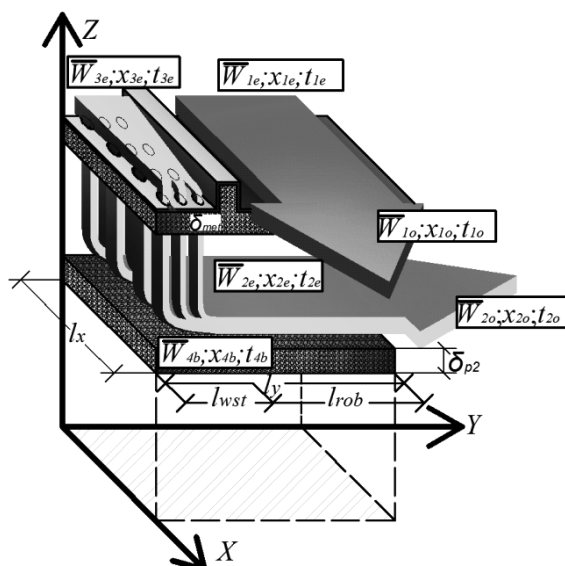
– Warunek początkowy i warunek symetrii dla ożebrowania:

$$t_{\text{rib1}} \left| \begin{array}{l} = t'_{p1} \\ \bar{Z}_1 = 0 \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} \partial t_{\text{rib1}} / \partial \bar{Z}_1 = 0 \\ \bar{Z}_1 = 1,0 \end{array} \right| \quad t_{\text{rib2}} \left| \begin{array}{l} = t'_{p2} \\ \bar{Z}_2 = 0 \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} \partial t_{\text{rib2}} / \partial \bar{Z}_2 = 0 \\ \bar{Z}_2 = 1,0 \end{array} \right|$$

Dodatkowo układ uzupełnia się empiryczną zależnością między zawartością wilgoci nasyczonej pary wodnej nad powierzchnią warstwy wody i jej temperaturą  $x' = f(t')$ .

W celu określenia wielkości NTU oraz liczby Lewisa (Le), wchodzących w układ równań modelu, niezbędne jest posiadanie informacji o charakterze praw rządzących zmianami gradientów wilgoci i temperatur w trakcie przepływu powietrza, jednakże jest to możliwe dopiero po wykonaniu dodatkowych badań numerycznych lub fizycznych.

W trakcie tworzenia modelu matematycznego obrazującego procesy wymiany ciepła i masy w rekuperatorze krzyżowym należy określić współczynnik wymiany masy  $\beta$  niezależnie od współczynnika wymiany ciepła  $\alpha$ , następnie ustalić wielkość liczby Lewisa, która będzie poprawką, w sytuacji, gdy warunki spełnienia zasady Lewisa zostaną naruszone. Podczas procesu iteracyjnego modelowania zakłada się kształt wzdłużnego gradientu różnic potencjałów transferu wilgoci i ciepła. Jeśli założony charakter wzdłużnego gradientu potencjałów oraz charakter uzyskany po rozwiązaniu równań różniczkowych nie są zgodne z założonymi, należy skorygować kształt założonych zależności funkcjonalnych gradientów. Cykl ten powtarzany jest do momentu uzyskania zgodności charakteru wzdłużnych profilów termodynamicznych na początku i końcu iteracji.



Rys. 6. Wizualizacja modelu matematycznego

Fig. 6. Mathematical model visualization

Zagadnienie to jest nieliniowe, dlatego niemożliwe jest uzyskanie rozwiązania metodami analitycznymi, z tego powodu całkowanie układu równań różniczkowych cząstkowych musi być realizowane się za pomocą metod numerycznych.

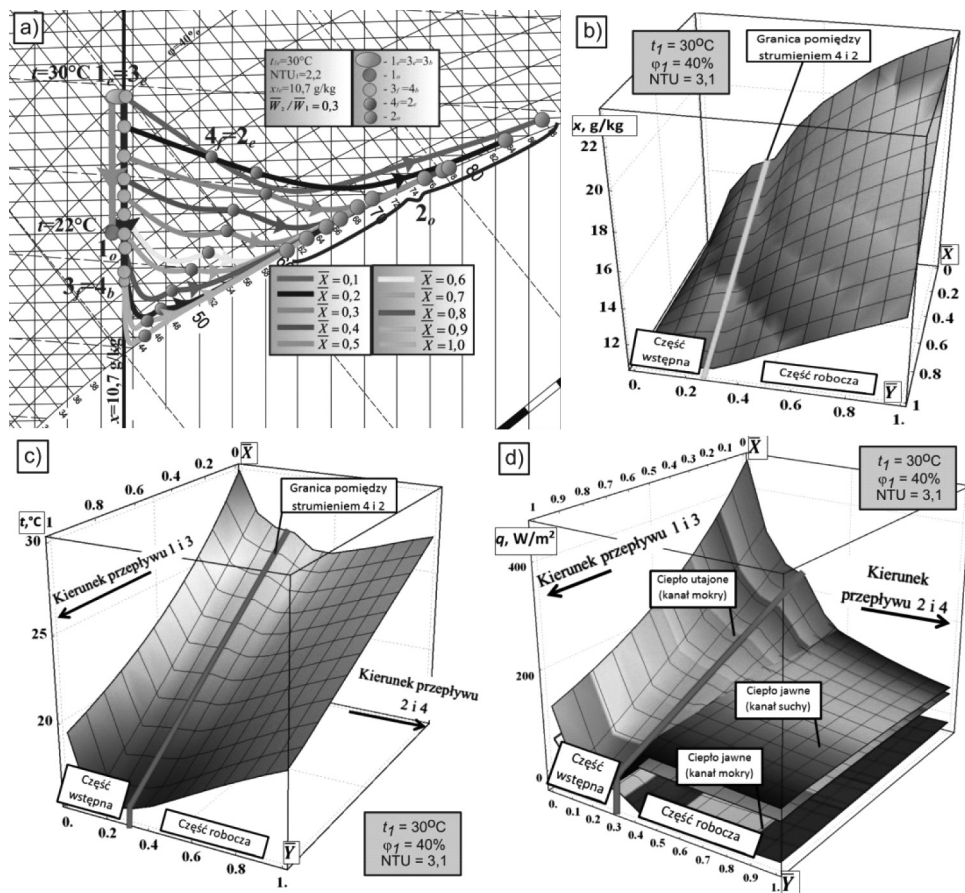
#### 4. Wyniki obliczeń

Na podstawie uzyskanych wyników wielowariantowych badań numerycznych stwierdzono, iż procesy wymiany ciepła i masy cechują się skomplikowanymi i różnorodnymi polami temperatur i zawartości wilgoci, które znacząco różnią się od zależności występujących w typowych wymiennikach wyparnych. Otrzymane wyniki pozwalają przypuszczać, że optymalizacja wymiennika będzie uzależniona od wzajemnych oddziaływań wielu znaczących czynników (aerodynamicznych, hydrodynamicznych, termodynamicznych konstrukcyjnych i innych).

Analiza powierzchniowego rozkładu temperatury w kanałach powietrza pomocniczego (rys. 7a,c) ujawniła fakt występowania czterech stref aktywnej wymiany ciepła i masy o podobnych cechach charakterystycznych: na początku części wstępnej rekuperatora  $\bar{Y} = 0 \div 0,15$  na rys. 7c) występuje intensywne obniżanie temperatury strumienia 4, połączone z przyrostem zawartości wilgoci. Następnie proces obniżania temperatury zostaje zahamowany, a na końcowych odcinkach części wstępnej  $\bar{Y} = 0 \div 3$  na rys. 7c) temperatura powietrza pomocniczego zaczyna wzrastać (rys. 7a, c). Jest to spowodowane faktem, iż przez nieprzepuszczającą wody ściankę, oddzielającą strumień pomocniczy i główny, dostarczany jest do wody praktycznie niezmienny strumień ciepła, który w sytuacji zmniejszającego się gradientu

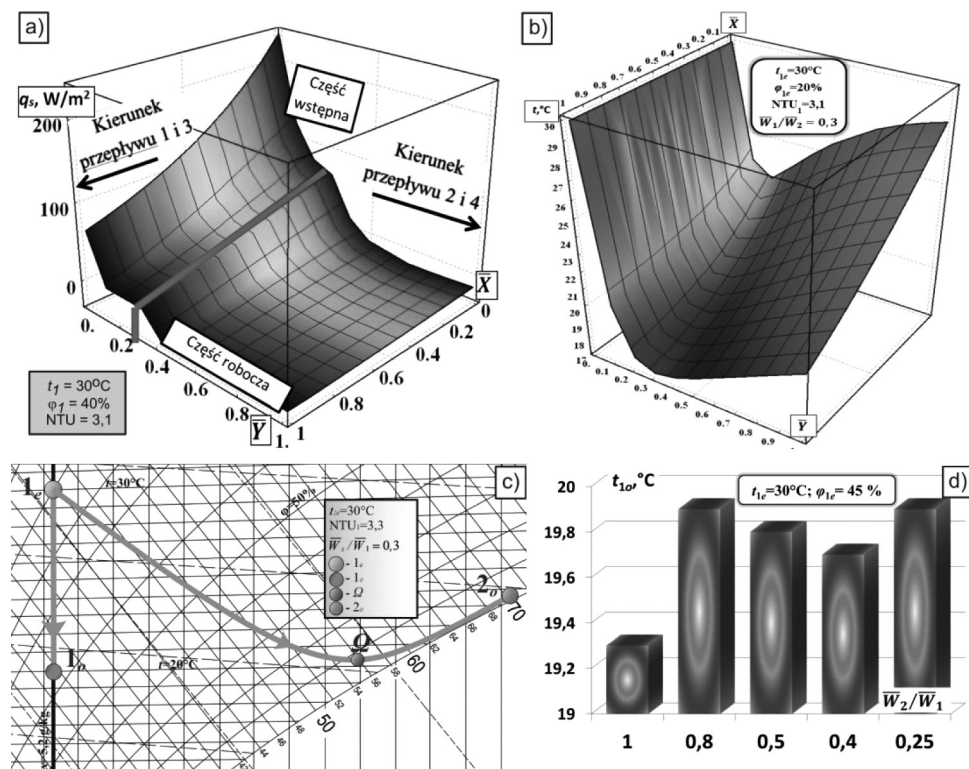
zawartości wilgoci w kanale przewyższa efekt chłodzenia uzyskany na drodze odparowania. Przejście przepływu pomocniczego do roboczej części wymiennika (punkt  $4_f = 2_e$  na rysunku 7a), a zatem zmiana stosunku liczbowego pojemności cieplnych strumieni wymieniających ciepło powoduje kolejną deformację pola temperatur w kanale mokrym (rys. 7a, c), a także deformację pola zawartości wilgoci (rys. 7b). Na początku roboczej części omawianego reku-peratora przepływ pomocniczy ponownie zaczyna obniżać swoją temperaturę ( $\bar{Y} = 0,3 \div 0,5$  na rys. 7a), na dalszych odcinkach kanału mokrego proces zostaje zahamowany, następnie strumień pomocniczy zaczyna się ogrzewać. Zjawisko to występuje we wszystkich analizowanych przekrojach jednostki (rys. 7a). Deformacja stref aktywnej wymiany ciepła i masy widoczna jest również na wykresie powierzchniowym obrazującym wymianę ciepła jawnego dla przepływu 4 i 2 (rys. 8a: wartość wykresu poniżej zera oznacza zmianę kierunku przepływu ciepła). W typowych wymiennikach wyparnych (np. w wymienniku o krzyżowym schemacie przepływu powietrza głównego i roboczego) zazwyczaj występują dwie strefy aktywnej wymiany ciepła i masy (rys. 8c, d), dodatkowa deformacja nie występuje (w pośrednim wyparnym wymienniku współprądowym często występuje tylko jedna strefa). Wynika to oczywiście z obecności dwóch zasadniczych części jednostki z M-obiegiem: wstępnej i roboczej. Obydwie strefy różnią się sposobem wymiany ciepła: w części wstępnej stosunek strumieni 3 i 4 jest zmienny, w części roboczej stosunek przepływów 1 i 2 jest stały. Ponadto ciągle mieszanie „mokrego” przepływu 4 i „suchego” 3 w mokrych kanałach strefy wstępnej dodatkowo zaburza pola temperatur i zawartości wilgoci.

Wstępne uzyskane wartości temperatur końcowych przepływu głównego dla klimatu Polski wykazały wysoką użyteczność obiegu Maistosenki w warunkach umiarkowanie wilgotnego klimatu (rys. 8d). Temperatury powietrza przeznaczonego do klimatyzacji pomieszczeń, w zależności od stosunku strumieni, wahały się od  $19,3^{\circ}\text{C}$  do  $19,8^{\circ}\text{C}$  (dla temperatury wejściowej  $30^{\circ}\text{C}$  i wilgotności względnej 45%). Temperatura strumienia nawiewanego na tym poziomie umożliwia dobrą asymilację zysków ciepła w pomieszczeniu o małym i średnim obciążeniu cieplnym. Należy dodatkowo zwrócić uwagę, jak znacząco poprawiłaby się efektywność tradycyjnych układów klimatyzacyjnych, gdyby w miejsce klasycznego wymiennika do odzysku ciepła umieścić jednostkę z M-obiegiem. Wysokosprawny wymiennik obrotowy umożliwia, przy tych samych parametrach powietrza zewnętrznego (i temperaturze pomieszczenia  $25^{\circ}\text{C}$ ), maksymalne ochłodzenie strumienia nawiewanego do ok.  $26^{\circ}\text{C}$ . Wymiennik z M-obiegiem generowałby oszczędność na poziomie  $8 \text{ kW/m}^3/\text{s}$ ! Należy ponadto pamiętać, że jednostka nie była jeszcze optymalizowana do polskiego klimatu, a jej konstrukcja pozwala na obniżenie temperatury powietrza zewnętrznego do bliskiej temperatury punktu rosy (w warunkach idealnych). Pozwala to przypuszczać, że adaptacja jednostki do warunków klimatycznych Polski umożliwi częściowe zastąpienie konwencjonalnych układów chłodniczych przez energooszczędne i korzystne ekologicznie rozwiązania oparte na nowoczesnych obiegach pośredniego ochładzania wyparnego.



Rys. 7. Wyniki symulacji numerycznej: a) ilustracja przemian na wykresie  $x$ - $i$  (procesy w kanale mokrym zestawione dla poszczególnych przekrojów); b) zawartość wilgoci w kanale pomocniczym; c) temperatura w kanale pomocniczym; d) wykres powierzchniowy wymiany ciepła

Fig. 7. The results of numerical calculations



Rys. 8. Wyniki symulacji numerycznej: a) wykres powierzchniowy wymiany ciepła jawnego dla przepływu 4 i 2; b) pole temperatur w kanale pomocniczym dla typowego wymiennika wyparnego (przepływ krzyżowy); c) ilustracje przemian na wykresie i-x dla krzyżowego wymiennika wyparnego; d) uzyskane temperatury powietrza nawiewanego w wymienniku z M-obiegiem dla polskich warunków (niemonotoniczność wykresu wynika z różnych wartości sumarycznego strumienia masowego powietrza głównego i pomocniczego, wynikających z specyfiki konstrukcyjnej jednostki, chronionej tajemnicą handlową)

Fig. 8. The results of numerical calculations

## 5. Wnioski

Przedstawiono oryginalny  $\epsilon$ -NTU-model umożliwiający symulacje procesów termodynamicznych w kanałach wypełnienia wymiennika do pośredniego ochładzania powietrza z pomocą odparowania cieczy opartego na obiegu Maisotsneki. Przedstawiono i uzasadniono algorytm rozwiązania układu równań modelu matematycznego procesów wymiany ciepła i masy w kanałach wyparnego wymiennika ciepła z M-obiegiem. Zaprezentowano propozycję rozwiązania algorytmicznego charakterystycznych dla omawianego cyklu chłodniczego procesów mieszania powietrza w części wstępnej jednostki. Na podstawie opracowanego algorytmu rozwiązania cząstkowych równań różniczkowych opracowano wielomodułowy program obliczeniowy, który pozwala na prowadzenie wielowariantowych symulacji nume-



rycznych procesów wymiany ciepła i masy w analizowanym rekuperatorze. Wstępna analiza wyników obliczeń wykazała fakt istnienia czterech stref aktywnej wymiany ciepła i masy w mokrym kanale powietrza pomocniczego. Wstępne wyniki wykazały wysoką użyteczność rekuperatora z M-obiegiem na terenie Polski. Obecnie w Instytucie Klimatyzacji i Ogrzewnictwa Politechniki Wrocławskiej trwają dalsze prace nad modelowaniem wymiennika z M-obiegiem, które umożliwią jego optymalną adaptację do polskich warunków klimatycznych.

## Literatura

- [1] Anisimov S.M., Bolotin S.A., *Badania krzyżowych wymienników ciepła do pośredniego ochładzania powietrza*, Wiadomości Międzynarodowej Akademii Nauk Ochrony Środowiska. Ochrona Powietrza Atmosferycznego, 1996, Nr 2, 18-21.
- [2] Žukauskas A., Žiugžda J., *Heat transfer in laminar flow of fluid*, Vilnius Lithuania 1969.
- [3] Materials of the COOLERADO™ Corporation.
- [4] Pandelidis D., Polushkin V., *Wymienniki do pośredniego ochładzania powietrza za pomocą odparowania cieczy*, Współczesne Metody i Techniki w badaniach Systemów Inżynierskich, Wrocław 2011.
- [5] Anisimov S., Żuchowicki J., *Wymiana ciepła i masy w urządzeniach do pośredniego ochładzania powietrza za pomocą parowania wody przy mieszanym schemacie przepływu czynników*, Nowe Techniki w Klimatyzacji – Materiały konferencyjne, Warszawa 2003.
- [6] Bogosłowski V.N., Poz M.J., *Podstawy fizyki cieplnej urządzeń systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji*, Strojizdat 1983.
- [7] Patankar S., *Metody numeryczne rozwiązań zagadnień wymiany ciepła i dynamiki cieczy*, Moskwa 1984.
- [8] Gillan L., *Maisotsenko cycle for cooling process*, Denver 2008.
- [9] Anisimov S., Pandelidis D., *Numerical study of the cross-flow heat and mass exchanger for indirect evaporative cooling*, Proceedings of the Xth International Scientific Conference „Indoor Air and Environment Quality”, Budapest 2012, 149-156.
- [10] Anisimov S., Pandelidis D., Polushkin V., *The influence of outdoor air parameters on the efficiency of cross-flow indirect evaporative heat exchanger*, Civil Engineers Bulletin, Russia 2012, in press.
- [11] Anisimov S., Pandelidis D., Polushkin V., *Use of indirect evaporative coolers in solar air conditioning units*, Recent developments in science and education, Russia 2012.



DOMINIKA BASTER, WOJCIECH ZAJĄC, JANINA MOLENDAN\*

## CHEMICZNA MODYFIKACJA POWIERZCHNI $\text{LiFePO}_4$ DLA UZYSKANIA MATERIAŁU KATODOWEGO DLA OGNIW LITOWYCH O WYSOKIEJ POJEMNOŚCI

### CHEMICAL SURFACE MODIFICATION OF $\text{LiFePO}_4$ AS CATHODE MATERIAL FOR HIGH DISCHARGE CAPACITY LITHIUM-ION BATTERIES

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono opis syntezy nanometrycznego  $\text{LiFePO}_4$  oraz metodę chemicznej modyfikacji powierzchni w celu uzyskania materiału katodowego dla ogniw typu *Li-ion* o wysokiej pojemności. Modyfikacja powierzchni polegała na poddaniu wyjściowego materiału działaniu atmosfery redukcyjnej (mieszanina  $\text{Ar-H}_2$ ) w temperaturze  $300^\circ\text{C}$ . Przygotowane materiały katodowe użyto do konstrukcji ogniw o schemacie  $\text{Li/Li}^+/\text{Li}_x\text{FePO}_4$ . Najlepsze uzyskane ogniwa charakteryzowały się pojemnością rozładowania  $158 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$  w ciągu 10 pierwszych cykli pracy przy odwracalności wynoszącej 0,99.

*Słowa kluczowe:*  $\text{LiFePO}_4$ , materiał katodowy, baterie *Li-ion*

#### Abstract

In this work, we presented a procedure of synthesis of the nano-sized  $\text{LiFePO}_4$  and method of chemical surface modification in order to obtain cathode material for *Li-ion* batteries with high discharge capacity. The surface modification of  $\text{LiFePO}_4$  were performed by annealing in reducing atmosphere ( $\text{Ar-H}_2$  mixture) at  $300^\circ\text{C}$ . The  $\text{LiFePO}_4$  powders were used as cathode material in  $\text{Li/Li}^+/\text{Li}_x\text{FePO}_4$  cells. They exhibited high discharge capacity around  $158 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$  in first 10 cycles and excellent cyclic ability around 0.99.

*Keywords:*  $\text{LiFePO}_4$ , cathode material, *Li-ion* batteries

\* Mgr inż. Dominika Baster, dr inż. Wojciech Zajęc, prof. dr hab. inż. Janina Molenda, Katedra Energetyki Wodorowej, Wydział Energetyki i Paliw, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza.

## 1. Wstęp

Rozwój rynku samochodów elektrycznych i hybrydowych jest uzależniony od dostępności źródeł energii o wysokiej gęstości energii (iloczyn pojemności ogniwa i generowanego napięcia) i wysokiej gęstości prądu. Możliwość uzyskania wysokiej gęstości energii powoduje, iż Li-ion batteries znajdują obecnie powszechne zastosowanie w zasilaniu przenośnych urządzeń elektronicznych. Pojemność Li-ion batteries wymagana do zasilania samochodów hybrydowych jest około 500 razy większa w porównaniu z pojemnością dla przenośnej elektroniki, a do samochodu w pełni elektrycznego około  $10^4$  razy większa [1]. Oprócz wysokiej pojemności ogniwa równie ważnymi parametrami są ich: żywotność, bezpieczeństwo pracy, brak toksyczności oraz koszty produkcji. Ponieważ materiał katodowy stanowi aż 30% w kosztach produkcji całego ogniwa [1] i w dużej mierze decyduje o efektywności pracy, obecnie trwają intensywne poszukiwania nowych materiałów katodowych dla akumulatorów litowych spełniających powyższe wymagania [2, 3].

Jednym z najbardziej obiecujących materiałów katodowych jest fosforan litowo-żelazowy  $\text{LiFePO}_4$  potocznie zwany fosfooliwinem o strukturze tryfilitu i grupie przestrzennej *Pnma* [4, 5].  $\text{LiFePO}_4$  ma liczne zalety, takie jak: wysoka pojemność teoretyczna ( $170 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ), wysokie napięcie pracy (3,45 V) oraz wysoka stabilność chemiczna względem elektrolitów używanych w ogniwach litowych [4–6]. Niestety wykazuje zbyt niskie przewodnictwo elektryczne rzędu  $10^{-9} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$  w temperaturze pokojowej oraz niskie przewodnictwo jonowe uwarunkowane jednowymiarowymi drogami dyfuzji jonów litu wzdłuż kierunku [010] [7, 8].

Obecnie najważniejsze wyzwanie w zastosowaniu fosfooliwiny jako materiału katodowego stanowi uzyskanie pojemności ładowania/rozładowania zbliżonej do teoretycznej dla dużych prądów. W celu poprawy jego właściwości modyfikuje się proces syntezy w kierunku uzyskania nanometrycznego materiału oraz stosuje się dodatki węglowe [9–12]. Najkorzystniejsze jest otrzymanie nanometrycznych cząstek w kształcie płytek z wyeksponowaną powierzchnią [010], co powinno zwiększyć efektywność procesu wymiany powierzchniowej jonów litu między katodą a elektrolitem i w rezultacie obniżyć polaryzację elektrody oraz poprawić wydajność prądową całego ogniwa [13]. Jednak jednowymiarowe drogi dyfuzji dla jonów litu łatwo ulegają zablokowaniu przez defekty punktowe jonów litu i żelaza, dystorsje oraz przez różnego rodzaju zanieczyszczenia [6]. Szczególnie istotna jest ochrona materiału przed utlenieniem jonów  $\text{Fe}^{2+}$  do elektrochemicznie nieaktywnych jonów  $\text{Fe}^{3+}$ ; chociaż wpływ obecności jonów  $\text{Fe}^{3+}$  na wydajność prądową ogniwa jest wciąż dyskusyjny [6]. Utlenianie materiału może zachodzić podczas syntezy na skutek kontaktu z powietrzem lub innymi utleniaczami [14–16] oraz podczas wygrzewania w argonie pod wpływem śladowych ilości tlenu. W szczególności niskotemperaturowe metody syntezy drobnokrystalicznych materiałów mogą narażać reagenty na kontakt z czynnikami utleniającymi. Aby zapobiec temu procesowi, uzyskany podczas syntezy materiał poddaje się dodatkowej obróbce termicznej mającej na celu redukcję powstających jonów  $\text{Fe}^{3+}$ .

W artykule przedstawiono procedurę syntezy nanometrycznego  $\text{LiFePO}_4$  metodą strącania z roztworu opisaną w [10, 11, 12]. Badano wpływ składu atmosfery obróbki termicznej na właściwości elektrochemiczne ogniwa zbudowanych w oparciu o uzyskany materiał. Określono przebieg krzywych woltamperometrycznych, pojemność właściwą materiału katodowego, odwracalność pracy ogniwa oraz jego stabilność podczas cyklicznego ładowania i rozładowania.

## 2. Procedura eksperymentalna

Proszek  $\text{LiFePO}_4$  otrzymano metodą zaproponowaną przez Delacourta [10]. Substraty:  $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ , Chempur, 99%,  $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , Fluka, 99,5% i  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , stężony (85%), Chempur, cz.d.a. rozpuszczono w mieszaninie wody i glikolu etylowego w stosunku objętościowym 1:1. Do wrzącej mieszaniny roztworu  $\text{FeSO}_4$  o stężeniu  $0,1\text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  i roztworu  $\text{H}_3\text{PO}_4$  o stężeniu  $0,1\text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  dodawano powoli roztwór  $\text{LiOH}$  o stężeniu  $0,3\text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  w celu zneutralizowania pH. Strącony szarozielony osad starzono przez 16 h pod chłodnicą zwrotną w temperaturze wrzenia. Uzyskany materiał odsączono, przemyto kilkakrotnie wodą destylowaną i suszono przez 12 h w temperaturze  $70^\circ\text{C}$ . Następnie produkt wygrzano w temperaturze  $300^\circ\text{C}$  przez 12 h w trzech różnych atmosferach: (i.) w argonie o wysokiej czystości ( $25\text{ cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $\text{O}_2 < 0,0005\%$  obj.); (ii.) w mieszaninie składającej się z 5 %obj.  $\text{H}_2$  w argonie ( $25\text{ cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ ); (iii.) w mieszaninie składającej się z 10 %obj.  $\text{H}_2$  w argonie ( $25\text{ cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ ).

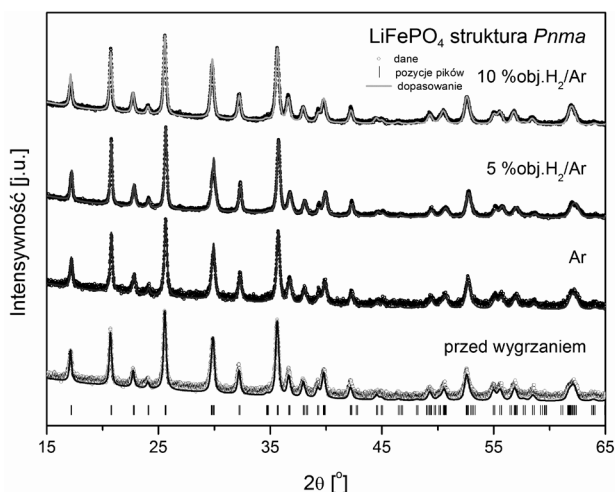
Skład fazowy otrzymanych materiałów, ich strukturę krystaliczną oraz wielkość krystalitów wyznaczono metodą dyfrakcji promieni rentgenowskich (XRD) z użyciem dyfraktogramu rentgenowskiego Panalytical Empyrean wyposażonego w lampę z anodą miedzianą. Parametry struktury krystalicznej uzyskanych materiałów wyznaczono z zastosowaniem metody Rietvela za pomocą oprogramowania GSAS/EXPGUI [17, 18]. Mikrostrukturę proszków określono za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) FEI Nova Nano SEM200. Przed pomiarem próbki zostały pokryte warstwą amorficznego węgla w celu wprowadzenia ładunku.

Do otrzymanych materiałów dodano grafit (Fluka, purum,  $<0,1\text{ mm}$ ) i sadzę (acetylene carbon black, Alfa Aesar, 99,9%) w proporcji 3:2, a następnie ucierano w moździerzu w atmosferze ochronnej argonu o wysokiej czystości. Uzyskane materiały katodowe wykorzystano do konstrukcji ogniw litowych. Jako substancję wiążącą pastę katodową zastosowano difluorek poliwinylidenu (PVDF, Aldrich) w ilości odpowiadającej 5 %wag. w końcowym materiale. Rozpuszczalnikiem dla PVDF oraz cieczą dyspergującą i zapewniającą właściwą lepkość był N-metylo-2-pirolidon (Aldrich 99,5%), który usuwano przez odparowanie w końcowej fazie przygotowania warstwy katodowej. W celu przygotowania warstw katodowych pastę katodową rozprowadzano na folii aluminiowej, następnie suszono w temperaturze  $70^\circ\text{C}$ , wycinano krążki o średnicy około 1 cm, prasowano pod naciskiem  $2\text{ t}\cdot\text{cm}^{-2}$  a następnie ponownie wygrzewano w temperaturze  $80^\circ\text{C}$  w atmosferze argonu o wysokiej czystości. Anodę testowanych ogniw stanowił metaliczny lit (Alfa Aesar, 99,9%, folia o grubości 1,5 mm), a jako elektrolit użyto roztworu  $\text{LiPF}_6$  (Aldrich, 99,99%) o stężeniu  $1\text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  w EC/DEC w stosunku objętościowym 1:1; EC = węglan etylenu (Aldrich, 99%), DEC – węglan dietylu (Aldrich, 99%). Do montażu ogniw zastosowano obudowy typu CR2032. Ogniwa przygotowywano i zamykano w atmosferze ochronnej argonu o wysokiej czystości ( $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} < 1\text{ ppm}$ ) w komorze manipulacyjnej model UNILAB firmy M. Braun Inertgas – Systeme GmbH.

Przygotowane ogniwa poddano cyklicznemu ładowaniu i rozładowaniu za pomocą amperostatu KEST electronics 32k z szybkością C/10, C/5, C/2, 1C, 2C, 5C, 10C, (szybkość 1C oznacza wartość prądu ładowania lub rozładowania konieczną do osiągnięcia całkowitej teoretycznej pojemności ogniwa w czasie 1 h). Dla każdej szybkości zarejestrowano 10 pierwszych cykli ładowania/rozładowania. Górne i dolne napięcia odcięcia wynosiły odpowiednio 4,4 i 2,5 V. Pomiary woltamperometryczne przeprowadzono z użyciem analizatora elektrochemicznego Autolab PGSTAT302 w zakresie napięć 2,4–4,5 V z szybkością skanowania  $1\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### 3. Wyniki i dyskusja

Dyfraktogram rentgenowski dla  $\text{LiFePO}_4$  po syntezie oraz materiału wygrzewanego w temperaturze  $300^\circ\text{C}$  w trzech różnych atmosferach wraz z dopasowaniem metodą Rietvelda przedstawiono na rys. 1. Wartości współczynników dopasowania  $R_p$ ,  $R_{wp}$  i  $\chi^2$  mieściły się odpowiednio w zakresie 0,78–4,58%, 1,01–5,80%, 0,789–1,631, co świadczy o dopasowaniu wysokiej jakości. Analiza uzyskanych dyfraktogramów potwierdziła, iż we wszystkich przypadkach otrzymano jednofazowy  $\text{LiFePO}_4$  o strukturze tryfilitu – układ rombowy, grupa przestrzenna  $Pnma$ . Średnia wielkość krystalitów  $\text{LiFePO}_4$  po syntezie wyznaczona metodą Scherrera wynosiła 35 nm. Rozmiary krystalitów  $\text{LiFePO}_4$  wygrzewanego w temperaturze  $300^\circ\text{C}$  w atmosferze argonu, 5 %obj.  $\text{H}_2$  w argonie i 10 %obj.  $\text{H}_2$  w argonie były równe odpowiednio 35, 36, 34 nm. Uzyskany wynik wskazuje na poprawny dobór temperatury wygrzewania, ponieważ nie zaobserwowano znaczącego rozrostu krystalitów, a wygrzewanie w atmosferze zarówno obojętnej, jak i redukcyjnej nie spowodowało zmian struktury krystalicznej  $\text{LiFePO}_4$ . Stosowanie atmosfery redukcyjnej pozwala na redukcję zanieczyszczeń zawierających  $\text{Fe}^{3+}$  powstających podczas syntezy i aktywację powierzchni ziaren (por. [12]).

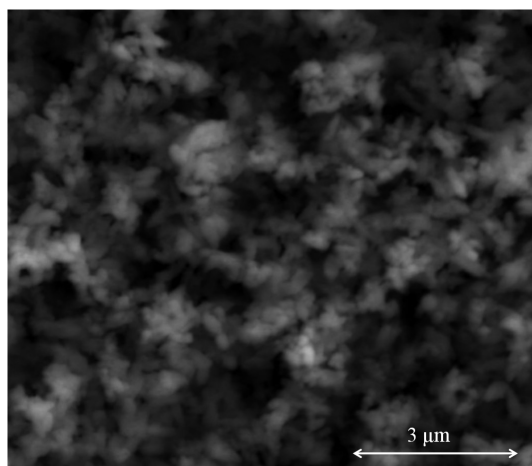


Rys. 1. Dyfraktogram rentgenowski wraz z dopasowaniem Rietvelda dla proszku  $\text{LiFePO}_4$  po syntezie i proszków wygrzanych w temperaturze  $300^\circ\text{C}$  w atmosferze o różnym składzie

Fig. 1. XRD pattern of  $\text{LiFePO}_4$  powder with Rietveld refinement after synthesis and after annealing at  $300^\circ\text{C}$  in various atmospheres

Na rysunku 2 przedstawiono morfologię proszku  $\text{LiFePO}_4$  wygrzewanego w temperaturze  $300^\circ\text{C}$  w atmosferze mieszaniny składającej się z 5 %obj.  $\text{H}_2$  w argonie. Jak to opisano we wcześniejszej pracy, wyjściowy materiał po syntezie składa się z płytkowych ziaren o wielkości  $50 \times 500 \times 500$  nm [11]. Wygrzewanie w  $300^\circ\text{C}$  spowodowało pewną modyfikację kształtu ziaren oraz wzrost ich izotropowości, lecz średni rozmiar ziaren pozostał w przybliżeniu na stałym poziomie. Być może na zmianę morfologii wpływa zmiana stopnia hydroksylacji powierzchni wywołana wygrzewaniem materiału w atmosferze redukcyjnej.





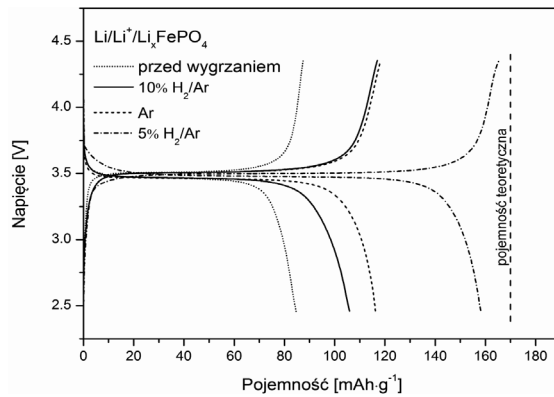
Rys. 2. Obraz SEM przedstawiający mikrostrukturę proszku LiFePO<sub>4</sub> po wygrzewaniu w temperaturze 300°C w atmosferze 5 %obj. H<sub>2</sub> w argonie

Fig. 2. SEM image of the LiFePO<sub>4</sub> powder after annealing at 300 °C in %obj. H<sub>2</sub>/Ar atmosphere

Porównanie krzywych ładowania i rozładowania pod obciążeniem prądowym C/10 ogniw, w których materiał katodowy preparowano trzema metodami zaprezentowano na rys. 3. Zgodnie z przebiegiem charakterystyk napięcie pracy (rozładowania) ogniwa, w którym LiFePO<sub>4</sub> wygrzewano w mieszaninie składającej się z 5 %obj. H<sub>2</sub> w argonie znajdowało się w zakresie 3,48–3,50 V. Dla pozostałych ogniw zakres ten wynosił 3,46–3,51 V. Z wykresu wynika, że najwyższe napięcie oraz najniższą polaryzację osiągnięto dla ogniwa, którego materiał katodowy przygotowano przez wygrzanie w 5 %obj. H<sub>2</sub> w argonie. Pojemność rozładowania tego ogniwa wynosiła 158 mAh·g<sup>-1</sup>, co stanowi 93% pojemności teoretycznej fosfooliwinu. Pozostałe ogniwa charakteryzowały się niższymi napięciami pracy o zbliżonych wartościach oraz większą polaryzacją, natomiast różniły się znacząco pojemnością rozładowania. Dla porównania wartości pojemności rozładowania wszystkich ogniw pod różnymi obciążeniami prądowymi w piątym cyklu pracy zestawiono w Tabeli 1. Na rys. 4 przedstawiono zależność pojemności rozładowania ogniw Li/Li<sup>+</sup>/Li<sub>x</sub>FePO<sub>4</sub> od natężenia prądu rozładowania. Na podstawie wykresu można stwierdzić, że wraz ze wzrostem szybkości rozładowania pojemność rozładowania maleje. Wraz ze wzrostem obciążeń prądowych od C/10 do 1C następowało monotoniczne (w przyjętym układzie współrzędnych) zmniejszanie się pojemności rozładowania ogniw. Zależność pojemności rozładowania od liczby cykli pracy (rys. 5) pokazuje, iż przygotowane ogniwa i materiały katodowe pracują w sposób stabilny i ich pojemność rozładowania praktycznie nie ulega pogorszeniu w ciągu pierwszych 10 cykli pracy.

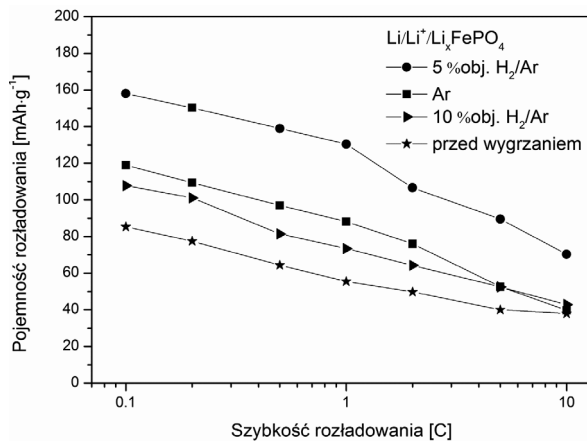
**Zestawienie pojemności rozładowania ogniw Li/Li<sup>+</sup>/Li<sub>x</sub>FePO<sub>4</sub> dla różnych szybkości rozładowania**

| Metoda modyfikacji chemicznej powierzchni | Pojemność rozładowania [mAh·g <sup>-1</sup> ] |     |     |     |     |    |     |
|---|---|-----|-----|-----|-----|----|-----|
|   | C/10  | C/5 | C/2 | 1C  | 2C  | 5C | 10C |
| 10 %obj. H <sub>2</sub> /Ar               | 108   | 101 | 81  | 73  | 64  | 52 | 43  |
| 5 %obj. H <sub>2</sub> /Ar                | 158   | 150 | 139 | 130 | 107 | 90 | 70  |
| Ar  | 119   | 109 | 109 | 88  | 76  | 53 | 40  |
| Przed wygrzaniem                          | 85  | 77  | 64  | 55  | 50  | 40 | 38  |



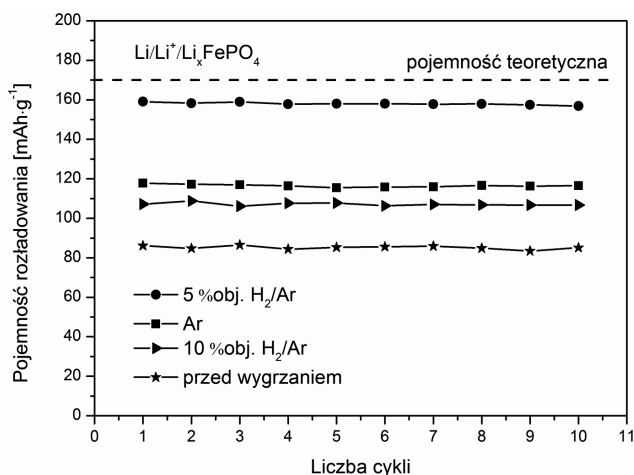
Rys. 3. Krzywe ładowania i rozładowania ogniw Li/Li<sup>+</sup>/Li<sub>x</sub>FePO<sub>4</sub> pod obciążeniem prądowym C/10

Fig. 3. The charge-discharge curves of the Li/Li<sup>+</sup>/Li<sub>x</sub>FePO<sub>4</sub> cells at rate C/10



Rys. 4. Zależność pojemności rozładowania od szybkości rozładowania ogniw Li/Li<sup>+</sup>/Li<sub>x</sub>FePO<sub>4</sub>

Fig. 4. Rate performance of the Li/Li<sup>+</sup>/Li<sub>x</sub>FePO<sub>4</sub> cells

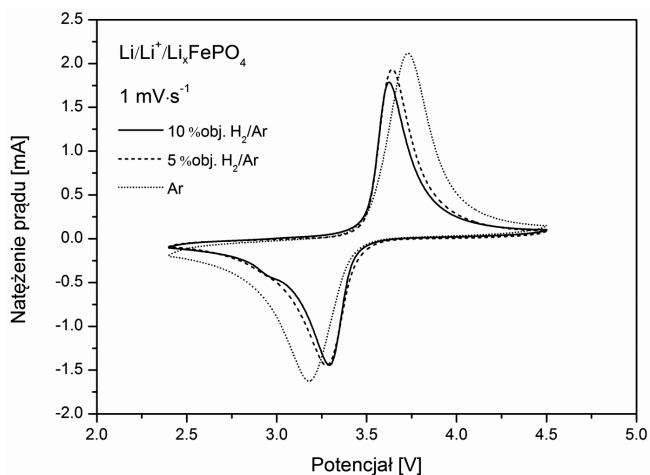


Rys. 5. Pojemność rozładowania ogniw  $\text{Li/Li}^+/\text{Li}_x\text{FePO}_4$  w kolejnych cyklach

Fig. 5. Discharge capacity of the  $\text{Li/Li}^+/\text{Li}_x\text{FePO}_4$  cells after consecutive cycles

Woltamperogramy cykliczne dla ogniw uzyskane w zakresie napięć 2,4–4,5 V przy szybkości polaryzacji  $1\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$  przedstawiono na rys. 6. Pik anodowy odpowiada procesowi delitacji  $\text{LiFePO}_4$  (ładowaniu ogniwa), natomiast pik katodowy związany jest z litiacją  $\text{FePO}_4$ , czyli rozładowaniem ogniwa. Różnice potencjałów pomiędzy pikiem utleniania, a pikiem redukcji dla materiału wygrzewanego w argonie, w 5 %obj.  $\text{H}_2$  w argonie oraz w 10 %obj.  $\text{H}_2$  w argonie wynoszą odpowiednio 0,33, 0,41, 0,55 V, a średnie potencjały pików anodowego i katodowego wszystkich ogniw są równe 3,46 V.

Wygrzewanie materiału w argonie spowodowało usunięcie zanieczyszczeń powstałych w procesie syntezy, co przyczyniło się do wzrostu pojemności rozładowania tego materiału w stosunku do materiału niewygrzewanego. Jednak wartość ta nadal odbiega znacznie od wartości teoretycznej pojemności fosfooliwinu, ponieważ 25% zawartego w nim żelaza stanowią nieaktywne elektrochemicznie jony  $\text{Fe}^{3+}$  [12]. Dopiero na skutek wygrzewania w mieszaninie redukcyjnej (5 %obj.  $\text{H}_2/\text{Ar}$ ) jony  $\text{Fe}^{3+}$  uległy redukcji do elektrochemicznie aktywnych jonów  $\text{Fe}^{2+}$ , co pozwoliło uzyskać pojemność materiału zbliżoną do pojemności teoretycznej. Zastosowanie mieszaniny redukcyjnej o zwiększonej zawartości wodoru (10 %obj.  $\text{H}_2/\text{Ar}$ ) nie przyniosło efektu w postaci dalszego wzrostu pojemności rozładowania. Przypuszcza się, że mieszanina silnie redukująca mogła spowodować częściową redukcję  $\text{LiFePO}_4$  do fosforków lub innych związków, które wydzielone w postaci fazy amorficznej nie można było zidentyfikować z użyciem metody dyfrakcji promieni rentgenowskich.



Rys. 6. Woltamperogramy cykliczne ogniwa  $\text{Li}/\text{Li}^+/\text{Li}_x\text{FePO}_4$

Fig. 6. Cyclic voltammograms curves of  $\text{Li}/\text{Li}^+/\text{Li}_x\text{FePO}_4$  cells

#### 4. Wyniki i dyskusja

Ogniwa przygotowane z materiału katodowego wygrzewanego w 5 %obj.  $\text{H}_2$  w aronie charakteryzowały się najwyższą pojemnością rozładowania, która przy szybkości rozładowania  $C/10$  wynosiła  $158 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ . Niższą pojemność osiągały ogniwa zmontowane z  $\text{LiFePO}_4$  wygrzewanego w argonie. Z przeprowadzonych badań wynika, że przyczynę stanowią zanieczyszczenia materiału po syntezie elektrochemicznie nieaktywnymi jonami  $\text{Fe}^{3+}$ , które zostały zredukowane przez wygrzanie w mieszaninie redukcyjnej. Dla materiału wygrzanego w atmosferze silnie redukcyjnej (10 %obj.  $\text{H}_2$  w aronie) zarejestrowano najniższe wartości pojemności rozładowania spośród materiałów modyfikowanych powierzchniowo. W wyniku redukcji najprawdopodobniej powstały elektrochemicznie nieaktywne zanieczyszczenia, np. fosforkami żelaza. Na dyfraktogramie rentgenowskim nie zidentyfikowano obecności innych faz, ponieważ zanieczyszczenia te mogą występować w postaci amorficznej.

*Praca została dofinansowana przez UE w ramach środków Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w ramach projektu UDA-POIG 01.01.02-00-108/09-03 oraz przez Europejski Instytut Innowacji i Technologii w ramach projektu KIC InnoEnergy NewMat.*

#### Literatura

- [1] Molenda J., *Material problems and prospects of Li-ion batteries for vehicles applications*, *Funct. Mat. Lett.*, 4, 2011, 107-112.
- [2] Goodenough J.B., *Cathode materials: A personal perspective*, *J. Power Sources*, 174, 2007, 996-1000.

- [3] Goodenough J.B., Kim Y., *Challenges for Rechargeable Li Batteries*, Chem. Mater., 22, 2010, 587-603.
- [4] Padhi A.K., Nanjundaswamy K.S., Goodenough J.B., *Phospho-olivines as Positive-Electrode Materials for Rechargeable Lithium Batteries*, J. Electrochem. Soc., 144, 4, 1997, 1188-1194.
- [5] Padhi A.K., Nanjundaswamy K.S., Masquelier C., Okada S., Goodenough J.B., *Effect of Structure on the  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  Redox Couple in Iron Phosphate*, J. Electrochem. Soc., 144, 1997, 1609-1613.
- [6] Yuan L., Wang Z., Zhang W., Hu X., Chen J., Huang Y., Goodenough J.B., *Development and challenges of  $LiFePO_4$  cathode material for lithium-ion Batteries*, Energy and Environ. Sci., 2011, 4, 269-284.
- [7] Tarascon J.-M., Armand M., *Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries*, Nature, 414, 2001, 359-367.
- [8] Molenda J., *Lithium-ion batteries – state of art. Novel phospho-olivine cathode materials*, Mater. Sci.-Poland, 24, 2006, 61-67.
- [9] Bruce P.G., Scrosati B., Tarascon J.M., *Nanomaterials for rechargeable lithium batteries*, Angew. Chem., Int. Ed., 47, 2008, 2930-2946.
- [10] Delacourt C., Poizot P., Levasseur S., Masquelier C., *Size effects on carbon-free  $LiFePO_4$  powders: The key to superior energy density*, Electrochem. Solid-State Lett., 9, 2006, A352-A355.
- [11] Zajęc W., Rusinek D., Molenda J., *Synteza i właściwości  $LiFePO_4$  – materiału katodowego dla ogniw typu Li-ion otrzymanego metodą niskotemperaturową*, Ceramic Mater., 63, 2011, 261-265.
- [12] Zajęc W., Marzec J., Maziarz W., Rakowska A., Molenda J., *Evolution of Microstructure and Phase Composition upon Annealing of  $LiFePO_4$  Prepared by a Low Temperature Method*, Funct. Mater. Lett., 4, 2011, 117-122.
- [13] Fisher C.A.J., Islam M.S., *Surface structures and crystal morphologies of  $LiFePO_4$ : relevance to electrochemical behaviour*, J. Mater. Chem., 18, 2008, 1209-1215.
- [14] Yamada A., Chung S.C. and Hinokuma K., *Crystal Chemistry of the Olivine-Type  $Li(Mn_yFe_{1-y})PO_4$  and „ $(Mn_yFe_{1-y})PO_4$  as Possible 4 V Cathode Materials for Lithium Batteries*, J. Electrochem. Soc., 148, 2001, A224-A967.
- [15] Julien C.M., Manger A., Ait-Salah A., Massot M., Gendron F., Zaghbi K., *Nanoscope scale studies of  $LiFePO_4$  as cathode material in lithium-ion batteries for HEV application*, Ionics, 13, 2007, 395-411.
- [16] Ait Salah A., Mauger A., Julien C.M. Gendron F., *Nano-sized impurity phases in relation to the mode of preparation of  $LiFePO_4$* , Mater. Sci. Eng., B, 129, 2006, 232-244.
- [17] Larson A.C., Von Dreele R.B., *GSAS General Structure Analysis System*, Los Alamos National Laboratory Report LAUR 86-748, 2004.
- [18] Toby B.H., *EXPGUI, a graphical user interface for GSAS*, J. Appl. Cryst., 34, 2001, 210.



MAREK BINIENDA\*, PAWEŁ JUST\*\*, JAROSŁAW KOMOROWSKI,  
MAGDALENA POKRZYWA, EMILIA WOŁOWIEC\*

## WPŁYW PROCESU AZOTONASIARCZANIA NA ZMIANĘ WYMIARÓW CZOPA WAŁU KORBOWEGO ODLANEGO METODĄ *LOST FOAM* ZE SFEROIDYZACJĄ „INMOLD”

### EFFECT OF CHANGE DIMENSIONS SULFONITRIDING CRANKSHAFT CHOP BY LOST FOAM CAST OF SPHEROIDIZATION INMOLD

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono sposób modyfikacji warstwy wierzchniej czopu korbowego metodą azotonasiarczania w celu polepszenia jego odporności korozyjnej, wyeliminowania możliwości zacierania wraz z uzyskaniem wysokiej trwałości elementu dzięki podniesieniu wytrzymałości na ścieranie poprzez zmniejszenie współczynnika tarcia a także zwiększenie twardości powierzchni. Wał korbowy z żeliwa sferoidalnego został odlany w technologii *lost foam* z sferoidyzacją *inmold*, obrabiony cieplnie, a następnie poddany obróbce cieplno-chemicznej. Zbadano własności warstwy azotonasiarczonej oraz przyrost wymiarów czopu powstały w wyniku obróbki cieplno-chemicznej.

*Słowa kluczowe: lost foam, inmold, azotonasiarczanie, obróbka cieplno-chemiczna, metoda Sulfonit, innowacyjne technologie odlewnicze*

#### Abstract

The paper shows how to modify the surface layer of the crank stud sulfonitriding method in order to improve its corrosion resistance, and eliminate the possibility of scuffing of the element to obtain a high durability by improving the abrasion resistance by decreasing the coefficient of friction and increasing the surface hardness. Ductile iron crankshaft was cast in the *lost foam* technology of spheroidization *inmold*, heat treated and then subjected to thermochemical treatment.

*Keywords: lost foam, inmold, sulfonitriding, thermochemical treatment, Sulfonit method, innovative casting technologies*

\* Mgr inż. Marek Binienda, Jarosław Komorowski, mgr inż. Magdalena Pokrzywa, Emilia Wołowiec, Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka.

\*\* Mgr Paweł Just, Katedra Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka.

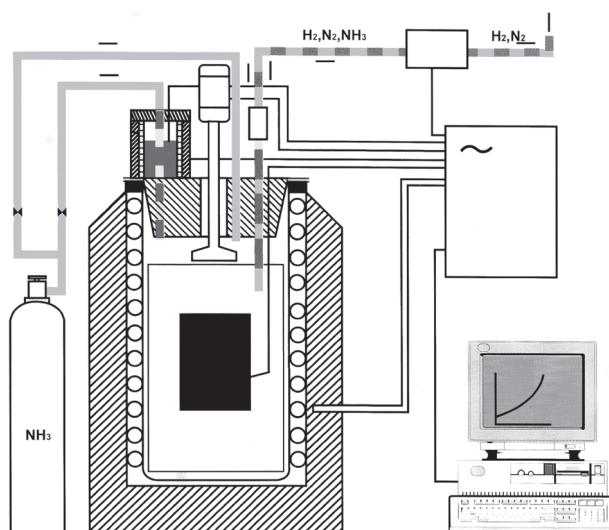


## 1. Wstęp

W związku ze wzrostem rozwoju przemysłu motoryzacyjnego żeliwo sferoidalne otrzymywane metodą *lost foam* ze sferoidyzacją in-mold jest ciekawą alternatywą dla drogich stali i innych stopów żelaza, ze względu na znaczne obniżenie kosztów produkcji i inwestycji w porównaniu z technologiami tradycyjnymi. Technologia ta umożliwia produkcję odlewów o dobrej dokładności wymiarowej i jakości oraz stosowanie mniejszych nadlewów i układów wlewowych. Wytwarzane tą metodą odlewy charakteryzują się większą w stosunku do metody tradycyjnej dokładnością wymiarową i w konsekwencji wymagają mniejszego nakładu pracy związanego z obróbką wykańczającą. Przeprowadzenie modyfikacji i sferoidyzacji w formie (in-mold) jest metodą przyjazną dla środowiska; używa się w niej niewielkiej ilości zaprawy magnezowej (0,7–2,0%), a jej reakcja z ciekłym żelazem jest prawie bezdymna. Metoda in-mold zapewnia największy procent uzyskania magnezu z zaprawy magnezowej, która wykorzystywana jest w reakcji sferoidyzacji żeliwa [1]. Zastosowanie w kolejnym kroku technik inżynierii powierzchni, takich jak azotonasiarczanie, zdecydowanie poprawia własności mechaniczne żeliwa sferoidalnego: między innymi pozwala uzyskać kilkakrotnie większą twardość powierzchni żeliwa sferoidalnego jak również zmniejszenie współczynnika tarcia [2].

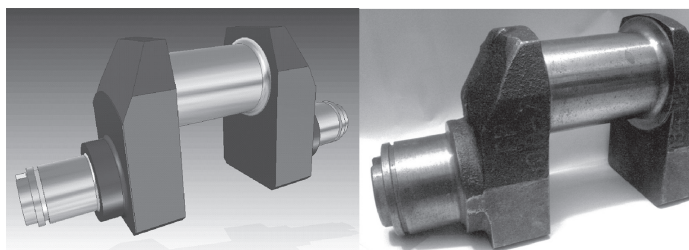
Azotonasiarczanie metodą Sulfonit przeprowadza się w piecu retortowym, w atmosferze amoniaku i par siarki, w temperaturze od 500 do 700°C, w czasie od 10 minut do kilku godzin. W wyniku procesu otrzymuje się warstwę azotowaną taką samą, jak w metodzie azotowania klasycznego, przy czym w fazie  $\epsilon$  wytworzone są siarczki żelaza. Decydujące znaczenie w eksploatacji elementów maszyn ma budowa strukturalna fazy  $\epsilon$  z wtrąceniami siarczku żelaza, które oddzielają powierzchnie tarciove i obniżają ich adhezję [3]. Prowadzi to do uzyskania wysokiej odporności na zużycie, niskich oporów tarcia, podwyższonej odporności korozyjnej i pełnej odporności na zacieranie. Możliwe jest także kształtowanie w szerokim zakresie struktury i właściwości warstwy wierzchniej poprzez sterowanie parametrami procesu oraz poprzez wytworzenie odpowiedniej ilości siarczku żelaza w fazie  $\epsilon$ .

W rzeczywistych rozwiązaniach konstrukcyjnych elementów maszyn i urządzeń obserwuje się jednoczesne zachodzenie różnych procesów tribologicznych zużycia (od normalnego po ścierne i zmęczeniowo-stykowe) [3, 4]. Mając to na uwadze, przeprowadzono badania azotonasiarczania pod kątem jego wpływu na wymiary przemysłowo stosowanych czopów korbowych, w których zachodzą powyższe procesy zużycia.



Rys. 1. Schemat urządzenia służącego do azotonasiarczenia metodą Sulfonit: 1) zasobnik z amoniakiem, 2, 3) zawory regulujące dopływ gazu, 4) zbiornik z siarką, 5) piec, 6) retorta, 7) wsad, 8) filtr wodny 9) kontrola stopnia dysocjacji amoniaku [3]

Fig. 1. Scheme of the sulfonitriding station: 1) tank with ammonia, 2, 3) gas flow regulating valves, 4) sulfur tank, 5) furnace, 6) retort, 7) batch, 8) water filter, 9) control the degree of dissociation of ammonia [3]



Rys. 2. Wał korbowy z żeliwa sferoidalnego: a) projekt wału korbowego wykonany w programie SolidEdge, b) wał korbowy przygotowany do obróbki azotonasiarczenia

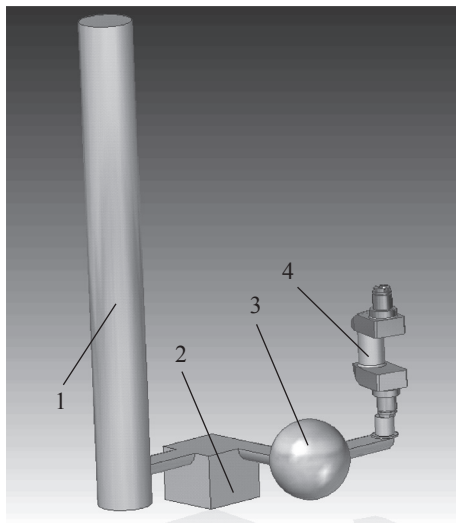
Fig. 2. Ductile iron crankshaft: a) crankshaft design made in SolidEdge, b) crankshaft machining sulfonitriding prepared

## 2. Materiały i metodyka badań

Do badań wykorzystano element mechanizmu korbowego silnika przenoszący ruch posuwisto-zwrotny tłoka na ruch obrotowy wału korbowego (czop korbowy). Metoda azotonasiarczenia gazowego Sulfonit, którą wykorzystano do jego ulepszenia nadaje się doskonale do obróbki cieplno-chemicznej zarówno żeliwnych, jak i stalowych części maszyn.

Badaniom poddano próbki pobrane z odlewów z żeliwa sferoidalnego. Odlewy te otrzymano innowacyjną metodą łączącą technologię *lost foam* z sferoidyzacją *inmold* [5]. Zestaw

modelowy składający się z układu wlewowego, komory reakcyjnej o kształcie prostopadłościanu, komory mieszania o kształcie ściętej kuli oraz dwóch odlewów próbnych wykonano metodą wycinania na ploterze termicznym z bloku styropianowego [6]. Schemat układu wlewowego wraz z odlewami próbnymi przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat układu wlewowego wraz z odlewem próbnym: 1) wlew główny, 2) komora reakcyjna, 3) komora mieszania, 4) odlew – wał korbowy

Fig. 3. The scheme of the gating system with experimental mould cavity: 1) pouring gate, 2) the reaction chamber, 3) mixing chamber, 4) cast – crankshaft

Żeliwo wytopiono w piecu indukcyjnym o pojemności wsadu 30kg PI-30. Do wytopów użyto surówki norweskiej OB, której skład przedstawiono w tabeli 1. Zawartość krzemu uzupełniono poprzez dodanie żelazokrzemu FeSi75. Do sferoidyzacji żeliwa w formie zastosowano zaprawę LAMET 5504 1–4 mm, w ilości 1,5% masy sferoidyzowanego żeliwa. Jest ona zarówno sferoidyzatorem i modyfikatorem grafityzującym [7]. Szczegółowy skład chemiczny zaprawy przedstawia tabela 2.

Po stopieniu wsadu kontrolowano jego temperaturę za pomocą termoelementu zanurzeniowego PtRh10-Pt. Formę zalewano żelazem o temperaturze 1550°C.

Table 1

#### Skład chemiczny norweskiej surówki OB

| Skład chemiczny [%] |       |       |       |       |        |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| C                   | Si    | Mn    | P     | S     | Fe     |
| 3,940               | 1,090 | 0,015 | 0,023 | 0,004 | 94,928 |

**Skład chemiczny zaprawy sferodyzująco-modyfikującej**

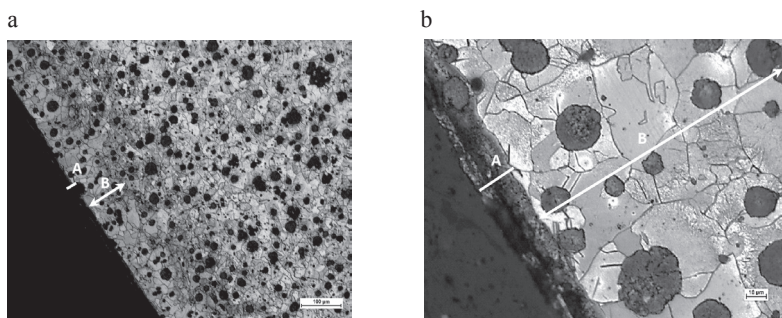
| Skład chemiczny [%] |         |         |         |         |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|
| Si                  | Mg      | Ca      | MZR     | Al      |
| 40,0–49,0           | 3,0–6,5 | 0,3–1,0 | 0,4–1,4 | 0,5–1,2 |

Materiał do badań mikroskopowych stanowiły próbki wycięte z odlewu próbnego z części walcowej czopu korbowego współpracującego z półpanewkami stopy korbowodu wykonane z żeliwa sferoidalnego. W celu umocnienia warstwy wierzchniej, przeprowadzono proces azotonasiarczania metodą Sulfonit.

Proces azotonasiarczania rozpoczęto od umieszczenia elementu w piecu retortowym, do którego dwoma przewodami doprowadzony był amoniak znajdujący się w butli ciśnieniowej. Na obu przewodach znajdowały się zawory regulujące natężenie przepływu gazu. Jednym przewodem amoniak przepływał bezpośrednio do retorty, drugim natomiast przepływał najpierw poprzez zbiornik z ciekłą siarką. W ten sposób pary siarki transportowane były do retorty. Obrabiane elementy umieszczono w retorcie ogrzewanej w piecu rezystancyjnie. Pary siarki opuszczające retortę wraz z częściowo zdysocjowanym amoniakiem wylapywane były przez filtr wodny. Stopień dysocjacji kontrolowano specjalistycznym miernikiem. Temperatura procesu azotonasiarczania elementu wynosiła 540°C i była utrzymywana przez 6 godzin. Temperatura siarki podawanej do wnętrza komory razem z amoniakiem wynosiła 160°C. Po procesie gotowy element poddano badaniom metalograficznym. Ponieważ proces azotonasiarczania jest procesem końcowym gotowych elementów maszyn i urządzeń, dlatego też po wykonanym procesie obróbki cieplno-chemicznej elementu nie poddano go żadnej obróbce mechanicznej.

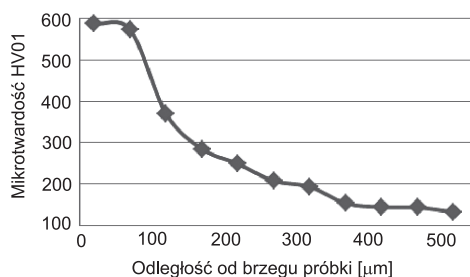
### 3. Wyniki badań i ich analiza

Wał korbowy wykonany z żeliwa sferoidalnego po procesie azotonasiarczania poddano badaniom metalograficznym oceniając mikrostrukturę i grubość warstwy azotonasiarczonej oraz dokonano pomiarów przyrostu średnicy czopu wału korbowego, która przed procesem wynosiła 40 mm. Na rys. 4 przedstawiono zdjęcie mikrostruktury czopu wałka korbowego. Grubość warstwy dyfuzyjnej wyniosła 170 µm natomiast średnica czopu powiększyła się o 20 µm. Jak można zauważyć w warstwie nie występują pęknięcia lub szczeliny co świadczy o dobrym zabezpieczeniu czopu przed czynnikami zewnętrznymi. Badania rozkładu twardości (rys. 5) wykazały dużą twardość bliską 600 HV na odcinku od powierzchni warstwy do 70 µm w głąb elementu, po czym twardość zmalała o 420 HV na odcinku 300 µm od powierzchni warstwy azotonasiarczonej.



Rys. 4. Mikrostruktura warstwy azotonasiarczanej wytworzonej metodą Sulfonit na żeliwie sferoidalnym (A –  $\epsilon$ +FeS+ $\gamma'$ , B – strefa azotowania wewnętrznego): a) powiększenie x 100 trawienie Mi1Fe, b) powiększenie x 500 trawienie Mi1Fe

Fig. 4. Microstructure of nodular cast iron after sulfonitriding (A –  $\epsilon$ +FeS+ $\gamma'$ , B – a zone of internal nitriding): a) magnification x 100 digestion Mi1Fe, b) magnification x 500 digestion Mi1Fe



Rys. 5. Rozkład mikrotwardości w warstwie azotonasiarczanej czopu wykonanego z żeliwa sferoidalnego

Fig. 5. Microhardness distribution in the sulfonitriding layer on ductile iron crankshaft

#### 4. Wnioski

Technologia *lost foam* ze sferoidyzacją inmold daje możliwość wykonania elementów z żeliwa sferoidalnego o dowolnym kształcie bez powiększania kosztów wytwarzania. Technologia ta eliminuje stosowanie rdzeni niezbędnych w tradycyjnej technologii odlewniczej do odwzorowania wewnętrznych powierzchni odlewu, zmniejsza liczbę urządzeń i oprzyrządowania technologicznego (brak formierek, mieszarek do sporządzania mas itp.) ze względu na zastosowanie masy formierskiej bez spoiwa. Wszystkie ww. zalety prowadzą do znacznego obniżenia kosztów produkcji. Korzyści potęgują zalety jednoczesnej sferoidyzacji w formie: duży uzysk Mg przewyższający 90%, brak zadymienia i świecenia, łatwość zautomatyzowania.

Połączenie metody odlewania z wykorzystaniem technologii *lost foam* z azotonasiarczaniem pozwala wytworzyć elementy pracujące z warunkach tarcia suchego, wysokich temperatur oraz w środowisku korozyjnym. Zastosowanie połączenia obu technologii pozwala na

znaczne obniżenie kosztów wytwarzania prototypów elementów maszyn i urządzeń narażonych na zużycie tribologiczne. Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, iż przyrost wymiarów czopu powstały w wyniku obróbki cieplno-chemicznej mieści się w granicach tolerancji wymiarowej, dlatego elementy poddane azotonasiarczeniu są gotowe do montażu bezpośrednio po procesie.

### Literatura

- [1] Pietrowski S., *Projekt Celowy*, Nr ROW-II-363/2008.
- [2] Haś Z., *Sposób obróbki cieplno-chemicznej części maszyn stalowych i żeliwnych*, Patent nr 72531.
- [3] Kula P., *Inżynieria warstwy wierzchniej*, Monografie 2000, PL.
- [4] Gawroński Z., *Technologiczna warstwa wierzchnia w kołach zębatych i mechanizmach krzywkowych*, Monografie 2005, PL.
- [5] Pacyniak T., Kaczorowski R., *Ductile cast iron obtaining by Inmold method with use of LOST FOAM process*, *Archives of Foundry Engineering*, vol. 8, Issue 3, July–September 2008.
- [6] Pacyniak T., Just P., *Wykonywanie modeli z spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych z wykorzystaniem plotera termicznego P 60 S firmy Megaplot*, Polska Metalurgia w latach 2006–2010, Kraków 2010.
- [7] Guzik E., *Procesy uszlachetniania żeliwa, Wybrane zagadnienia*, Polska Akademia Nauk, Katowice 2001.





MARCIN CZORA, FLORIAN GAMBUŚ\*

## SAMOCHEODOWE REAKTORY KATALITYCZNE ORAZ ICH WPŁYW NA ŚRODOWISKO

### AUTOMOBILE EXHAUST CATALYSTS AND THEIR IMPACT ON THE ENVIRONMENT

#### Streszczenie

Zastosowanie samochodowych reaktorów katalitycznych zmniejszyło stężenie emitowanych wraz ze spalinami zanieczyszczeń o 80–90%. Ich stosowanie wiąże się jednak z dodatkową emisją rzadkich metali (platyny, rodu i palladu) do środowiska. Szybko zaczęto stwierdzać śladowe ilości tych metali w glebie w pobliżu tras komunikacyjnych. Wykrycie platynowców w środowisku dało impuls do intensywnych badań nad ich bioakumulacją i wpływem na zdrowie ludzi.

*Słowa kluczowe: samochodowe reaktory katalityczne, platynowce*

#### Abstract

The use of automotive catalytic converters reduced amount of nitrogen oxides, carbon monoxide and hydrocarbons in the exhaust gases for 80–90%. The catalytic converters leads to the additional separation of rare metals (platinum, rhodium and palladium) into the environment. Traces of these metals were found soon after in the environment, initially only in the soil near the routes. Detection of platinum in the environment triggered intensive research for their possible bioaccumulation and influence to the human health.

*Keywords: automobile exhaust catalysts, Platinum Group Metals*

\* Mgr Marcin Czora, prof. dr hab. inż. Florian Gambuś, Katedra Chemii Rolnej i Środowiskowej, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie.

**Alfabetyczny wykaz skrótów stosowanych w tekście:**

- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – tlenek glinu (III);  
Ce – cer;  
Cu – miedź;  
CO – tlenek węgla (II), czad;  
CO<sub>2</sub> – ditlenek węgla;  
ECE – ang. *United Nations Economic Commission for Europe*, skrót: UNECE lub ECE Europejska Komisja Gospodarcza;  
Eh – potencjał elektrochemiczny, potencjał redoks;  
FA – ang. *fulvic acid*, kwas fulwowy;  
GUS – Główny Urząd Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej;  
HC – węglowodory, ogół zawartości niespalonych węglowodorów w spalinach;  
HMW – ang. *High Molecular Weight*, cząsteczka o dużej masie;  
L – litr;  
La – lantan;  
LMW – ang. *low molecular weight*, cząsteczka o małej masie;  
LPG – ang. *Liquefied Petroleum Gas* – mieszanina propanu i butanu stosowana jako paliwo;  
M – mol, jednostka liczności materii;  
N<sub>2</sub> – azot atmosferyczny;  
NaCl – chlorek sodu;  
NO<sub>x</sub> – tlenki azotu;  
rpm – obr./min (1/min) – obroty na minutę, prędkość obrotowa;  
PBET – ang. *Physiologically Based Extraction Test* – metoda polegająca na symulowaniu warunków panujących w żołądku oraz jelitach człowieka;  
PGE – ang. *Platinum Group Elements* – platynowce, pierwiastki z grupy platyny;  
PGM – ang. *Platinum Group Metals* – platynowce, metale z grupy platyny;  
pH – ujemny logarytm dziesiętny aktywności jonów hydroniowych wyrażony w molach na decymetr sześcienny;  
PM – ang. *Particulate matter* – jest zanieczyszczeniem powietrza składającym się z mieszaniny cząstek stałych i ciekłych, zawieszonych w powietrzu;  
Pd – pallad;  
PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> – anion kwasu ortofosforowego;  
Pt – platyna;  
PtAs<sub>2</sub> – sperylit, minerał, arsenek platyny;  
PtS – kuperyt, minerał, siarczek platyny;  
Rh – rod;  
Ru – ruten;  
Zn – cynk;  
Zr – cyrkon;  
μ – przedrostek mikro – 10<sup>-6</sup>.

## 1. Rozwój transportu w Polsce na przestrzeni ostatniej dekady

Transport jest jednym z najszybciej rozwijających się działów polskiej gospodarki. W 2000 roku na polskich drogach jeździło prawie 10 mln zarejestrowanych pojazdów osobowych, w 2011 roku było ich już ponad 18 mln (tab. 1). Przeciętnie przybywało rocznie 700 tysięcy nowych pojazdów. Równocześnie wzrasta liczba innych środków transportu [1].

Tabela 1

### Liczba pojazdów samochodowych i ciągników zarejestrowanych (Dane w tys. szt.)

| Pojazdy             | 2000 | 2005  | 2010  | 2011  |
|---------------------|------|-------|-------|-------|
| Samochody osobowe   | 9991 | 12339 | 17240 | 18125 |
| Autobusy            | 82   | 80    | 97    | 100   |
| Samochody ciężarowe | 1879 | 2305  | 2982  | 3131  |
| Ciągniki            | 1253 | 1243  | 1566  | 1614  |
| Motocykle           | 803  | 754   | 1013  | 1069  |

Oprócz swych niewątpliwych korzyści, transport samochodowy stanowi poważne zagrożenie dla środowiska. Drogi i autostrady przecinają szlaki migracyjne zwierząt. Liczba zwierząt przejechanych bądź potrąconych przez samochody jest trudna do oszacowania. Innym czynnikiem jest wytwarzanie spalin samochodowych. Źródła mobilne stanowią jedno z podstawowych źródeł zanieczyszczeń gazowych powietrza, w szczególności tlenków azotu  $\text{NO}_x$  – 43% całkowitej emisji tlenków azotu w 2011 roku [1].

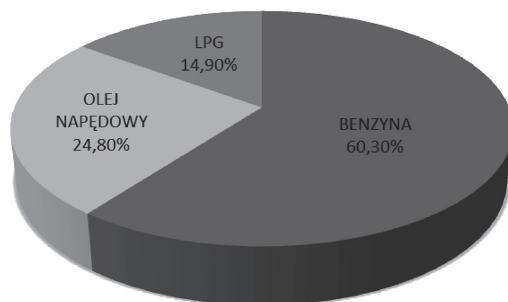
Silniki samochodów można podzielić ze względu na sposób zapłonu mieszanki paliwowej, na silniki benzynowe o zapłonie iskrowym oraz silniki o zapłonie samoczynnym, w których spalaniem paliwem jest olej napędowy.

Z chemicznego punktu widzenia głównymi składnikami benzyn są węglowodory alifatyczne o liczbie atomów węgla od 5 do 12. Występują również śladowe ilości węglowodorów nienasyconych oraz aromatycznych [2]. Olej napędowy jest mieszaniną węglowodorów parafinowych, naftenowych i aromatycznych, wydzielonych z ropy naftowej w procesach destylacyjnych. Destylaty oleju napędowego charakteryzują się znacznie wyższymi temperaturami wrzenia (180–350°C) niż destylaty, z których produkuje się benzynę [3].

Rodzaj stosowanego paliwa w pojazdach samochodowych ma wpływ na emisję toksycznych składników spalin oraz na rodzaj stosowanego reaktora katalitycznego. Na rysunku 1 zaprezentowano podział pojazdów, ze względu na rodzaj stosowanego paliwa, na podstawie danych z Głównego Urzędu Statystycznego [4].

Pojazdy LPG (zasilane gazem płynnym), przez wzgląd na podobieństwo składu emitowanych spalin, można zaliczyć do pojazdów benzynowych [5]. W związku z tą cechą  $\frac{3}{4}$  pojazdów można zaliczyć do grupy pojazdów wyposażonych w silniki o zapłonie iskrowym, a  $\frac{1}{4}$  do grupy pojazdów wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym.

Podział jest ten niezwykle ważny, gdyż ze względu na różny skład chemiczny paliwa oraz różne warunki przebiegu procesu spalania uzyskuje się różny skład chemiczny spalin (tab. 2).



Rys. 1. Rozkład pojazdów ze względu na stosowanie paliwa

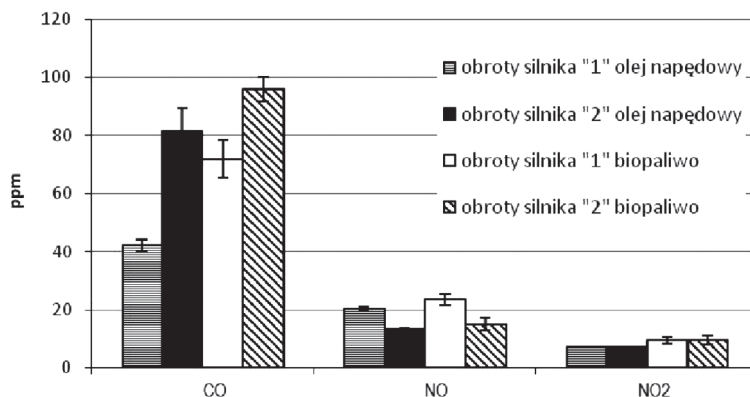
Fig. 1. The distribution of vehicles according to fuel used

Tabela 2

#### Udział emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie iskrowym i samoczynnym [6]

| Zanieczyszczenie | Zapłon iskrowy [%] | Zapłon samoczynny [%] |
|------------------|--------------------|-----------------------|
| CO               | 83                 | 17                    |
| CH               | 25                 | 75                    |
| NO <sub>x</sub>  | 86                 | 14                    |

Stosowanie paliw z biokomponentami („biodiesli”), do którego zobowiązani jesteśmy jako sygnatariusze *Protokołu z Kioto*, również zmienia skład chemiczny spalin, powodując nawet zwiększenie stężenia niektórych składników spalin (rys. 2).



Rys. 2. Porównanie składu spalin z silników dla których paliwem był olej napędowy lub paliwo z biokomponentami dla dwóch prędkości obrotowych: obroty silnika „1” – 720 obr./min, obroty silnika „2” – 960 obr./min, [7]

Fig. 2. Comparison of the exhaust gas from diesel fuel and bio-fuels composition for two different engine speed: „1” – 720 rpm, „2” – 960 rpm, [7]

Ilość spalin zależy również od typu silnika. Pojazdy z silnikiem Diesla emitują o około 40% zanieczyszczeń mniej w porównaniu do silników o zapłonie iskrowym [5]. Jaroszek i Wieszała [5], uwzględniając specyfikę pojazdów poruszających się po polskich drogach (stosunek pojazdów benzynowych do diesli, oraz ich wiek), obliczyli średnią emisję na odcinku jednego kilometra dla poszczególnych zanieczyszczeń wydzielanych wraz ze spalinami dla 350 pojazdów jadących w ciągu godziny z prędkością średnią 73 km/h.

Średnia emisja zanieczyszczeń:

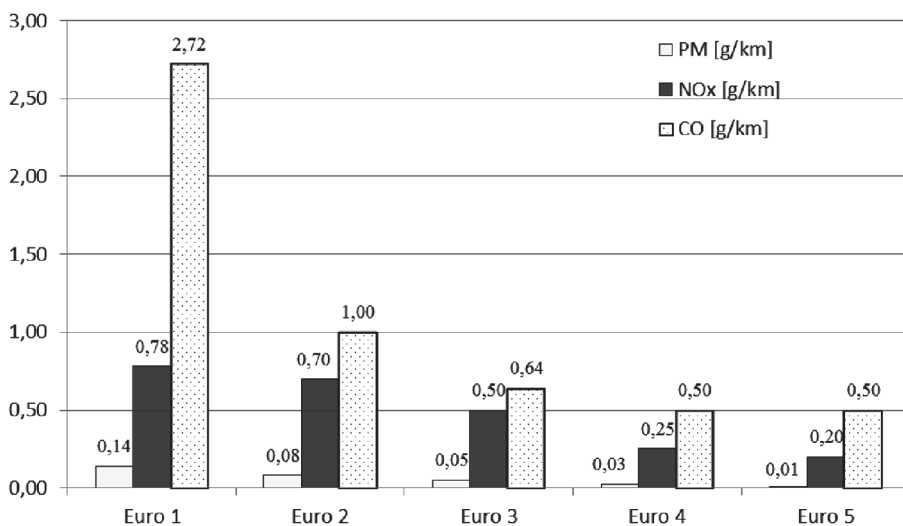
- dla pojazdów z silnikiem iskrowym:
  - CO – 230,52 g/km,
  - HC – 20,81 g/km,
  - NO<sub>x</sub> – 53,55 g/km;
- dla pojazdów z silnikiem samoczynnym:
  - CO – 12,67 g/km,
  - HC – 3,70 g/km,
  - NO<sub>x</sub> – 42,19 g/km,
  - PM – 5,12 g/km.

## 2. Normy emisji spalin

Wraz ze wzrostem liczby samochodów oraz ilością wydzielanych spalin wprowadzano normy emisji spalin do środowiska. Pierwsze takie normy wprowadzono w latach 70. ubiegłego wieku w Stanach Zjednoczonych. Z biegiem lat kolejne państwa wprowadzały własne normy, które stopniowo modyfikowano, np. normy ECE-15.01 do ECE-15.04 [5]. Wprowadzenie w Unii Europejskiej Norm Euro pozwoliło na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń wraz ze spalinami o 80–90% [8].

Charakterystyka norm Euro:

- Euro 1 – obowiązywała od 1993 roku. Dyrektywa 91/441/EC dla samochodów osobowych oraz dla osobowych i lekkich ciężarówek – 93/59/EEC. Norma ta wprowadziła konieczność stosowania paliwa bezołowiowego;
- Euro 2 – obowiązywała od 1996 roku. Dyrektywa 94/12/EC (& 96/69/EC) dla samochodów osobowych. Wymagała redukcji o 30% CO i 55% HC oraz 55% NO<sub>x</sub> odpowiednio w stosunku do normy Euro I;
- Euro 3 – obowiązywała od 2000 roku. Dyrektywa 98/69/EC dla wszystkich pojazdów. Wprowadziła nowy test homologacji, zmniejszenie poziomów emisji toksycznych substancji w porównaniu z normą Euro II (odpowiednio 30%, 40% i 40% dla CO, HC i NO<sub>x</sub>) i konieczność diagnostyki pokładowej (OBD). Na podstawie normy Euro III pojazdy zostały wyposażone w podwójne czujniki lambda;
- Euro 4 – obowiązywała od 2005 roku. Dyrektywa 98/69/EC (& 2002/80/EC) dla wszystkich pojazdów. Wymagała dodatkowej redukcji o 57% CO i o 47% HC i NO<sub>x</sub> w porównaniu z normą Euro III;
- Euro 5 – obowiązuje od 2009 roku. Dyrektywa 2007/715/EC dla lekkich samochodów osobowych i służbowych. Norma ta to kontynuacja zmniejszenia emisji NO<sub>x</sub> o 20% w porównaniu z normą Euro IV (rys. 3).



Rys. 3. Emisje PM, CO i NO<sub>x</sub> w spalinach zgodnie z kolejnymi normami Euro, dla silników Diesel  
 Fig. 3. Emissions of PM, CO, and NO<sub>x</sub> in the exhaust gases in accordance with the subsequent Euro standards for Diesel engines

W 2008 roku Parlament Europejski uchwalił normę Euro 6, która dotyczy poziomu zanieczyszczeń emitowanych przez ciężkie pojazdy samochodowe (dyrektywa 2007/715/EC). Wprowadzenie jej jest planowane w 2014 roku. Dopuszczalna wartość emisji tlenków azotu ma wynieść 80 mg/km, a więc o 50% mniej niż w normie Euro 5. Łączna masa węglowodorów i tlenków azotu pochodzących z pojazdów wyposażonych w silnik Diesel zostanie również zmniejszona do 170 mg/km w odniesieniu do samochodów oraz innych pojazdów przeznaczonych do przewozu. Euro 6 zacznie obowiązywać 1 września 2014 r. w zakresie homologacji, a 1 września 2015 r. w zakresie rejestracji oraz sprzedaży nowych typów pojazdów [9].

W emisji zanieczyszczeń bardzo ważny jest również wiek pojazdu. Znajomość tych danych pozwala również oszacować do jakich norm emisji Euro dany pojazd został przystosowany.

Według raportu Głównego Urzędu Statystycznego [4] rozkład wiekowy samochodów osobowych poruszających się po polskich drogach w 2011 roku prezentował się następująco:

- 688 440 pojazdów w wieku do 2 lat (3,8% samochodów osobowych),
- 1 254 298 pojazdów w wieku od 3 do 5 lat (6,92% samochodów osobowych),
- 2 182 514 pojazdów w wieku od 6 do 9 lat (12,04% samochodów osobowych),
- 5 701 673 pojazdów w wieku od 10 do 15 lat (31,46% samochodów osobowych),
- 3 563 559 pojazdów w wieku od 16 do 20 lat (19,66% samochodów osobowych),
- 4 734 416 pojazdów w wieku 21 lat i więcej (26,12% samochodów osobowych).

Samochody wyprodukowane przed rokiem 1992 (czyli mające więcej niż 21 lat) nie zostały dostosowane do żadnych norm emisji Euro.

### 3. Budowa samochodowych reaktorów katalitycznych

Typowy samochodowy reaktor katalityczny składa się z dwóch bloków ceramicznych, wypełnionych rzędem kanalików. Na ściankach tych kanalików zostają naniesione metale z grupy platyny (platyna, pallad, rod). Czasami stosuje się skrót PGM, z ang. *Platinum Group Metals*. Pierwszy blok ceramiczny (ten bliżej silnika) „napyłany” jest platyną i rodem, drugi platyną i palladem. Pomimo tej samej funkcji katalizatorów, jaką jest przekształcenie trującego gazu w ditlenek węgla i parę wodną, katalizatory różnią się budową, masą oraz udziałem poszczególnych pierwiastków (tab. 3).

Ze względu na realizowaną funkcję katalizatory dzieli się na: redukujące, utleniające oraz trójfunkcyjne, zwane trójdrożnymi.

Katalizator redukujący ma za zadanie zmniejszyć w spalinach zawartość tlenków azotu  $\text{NO}_x$ . Reakcja polega na rozkładzie ww. substancji na tlen  $\text{O}_2$  i azot  $\text{N}_2$ . Katalizator utleniający zmniejsza w spalinach zawartość tlenku węgla (II) oraz węglowodorów, zapisywanych jako HC. Utlenione CO i HC stają się „nieszkodliwymi”  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ . Katalizator trójfunkcyjny wykonuje te trzy reakcje, czyli redukcję  $\text{NO}_x$ , utlenianie CO oraz utlenienie HC, równocześnie.

Najczęściej używane trójdrożne reaktory katalityczne typu monolit mają ceramiczną strukturę pokrytą tlenkiem glinu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , która stanowi podłoże dla pierwiastków z grupy platyny [10] osadzonych w postaci bardzo drobnych cząstek o średnicach rzędu nanometrów (1–10 nm). Zawartość pierwiastków PGM przeważnie nie przekracza 0,1% masy katalizatora. Oprócz platynowców warstwa nośnika zawiera zwykle inne pierwiastki takie, jak: Zr, Ce, La, które pełnią rolę katalitycznych promotorów i stabilizatorów zapobiegających starzeniu się katalizatora [10].

Platynowce są uważane za bardzo skuteczne katalizatory, które z łatwością przeprowadzają wiele reakcji redox i dodatkowo są odporne chemicznie. Naturalnie ich odporność ma swoje granice i zdarzają się przypadki pasywacji PGM spowodowane obecnością ołowiu, fosforu lub innych związków zawartych w spalinach [13]. Główną przyczyną niszczenia reaktorów katalitycznych są skrajne warunki pracy silnika, takie jak: termiczne i mechaniczne naprężenia, kwasowy charakter spalin, oraz iskry i zbyt wysoka temperatura pracy [13]. Uważa się, że samochodowe reaktory katalityczne tracą 25% swej aktywności po około 80 tys. km, a zużywają się całkowicie po około 150 tys. km.



**Zawartość platynowców w katalizatorach [12]**

| Marka pojazdu | Zawartość PGM [g] |        |      | Masa katalizatora [kg] |
|---------------|-------------------|--------|------|------------------------|
|               | Platyna           | Pallad | Rod  |                        |
| Audi          | 1,4               |        | 0,2  | 0,95                   |
| BMW           | 2                 |        |      | 0,5                    |
| Chrysler      | 0,25              | 0,45   | 0,04 | 2,5                    |
| Daewoo        | 1,3               |        |      | 1                      |
| Fiat          |                   | 1,9    | 0,2  | 0,6                    |
| Fiat          |                   | 1,6    | 0,2  | 0,64                   |
| Ford          | 0,6               | 0,4    |      | 1,3                    |
| Ford          | 0,5               |        |      | 0,6                    |
| Ford          | 0,5               |        |      | 0,65                   |
| Honda         | 1,2               |        |      | 0,8                    |
| Hyundai       | 2                 |        |      | 1,1                    |
| Hyundai       | 1,8               |        |      | 0,6                    |
| Jaguar        | 1,6               |        | 0,3  | 0,9                    |
| Jeep          | 0,13              | 0,7    | 0,15 | 2                      |
| Mazda         |                   | 1,4    |      | 0,4                    |
| Mazda         | 0,8               |        |      | 0,4                    |
| Mercedes      | 1,8               |        |      | 1,5                    |
| Mercedes      |                   | 2,3    |      | 0,55                   |
| Mini          |                   | 0,9    |      | 0,8                    |
| Mitsubishi    | 0,5               | 0,5    | 0,2  | 1                      |
| Opel          | 0,9               |        | 0,2  | 1,5                    |
| Opel          | 1,3               |        |      | 1,6                    |
| Peugeot       |                   | 1,4    |      | 0,4                    |
| Peugeot       |                   | 2      |      | 0,6                    |
| Polonez       | 1                 |        |      | 0,6                    |
| Renault       | 0,6               |        |      | 0,8                    |
| Renault       | 0,6               |        |      | 0,9                    |
| Subaru        | 0,2               |        |      | 0,8                    |
| Suzuki        | 1,3               |        |      | 0,4                    |
| Volvo         |                   | 2,1    |      | 0,9                    |
| VW            |                   | 4,4    |      | 0,8                    |

#### 4. Zawartość platynowców w glebie

W 2001 roku, analizując próbki gleb z okolic Meksyku (miasta), wykazano, że zawartość platynowców w pobliżu ruchliwej szosy przekracza około 100-krotnie stężenia PGM charakterystyczne dla terenów znajdujących się z dala od ruchu drogowego i to pomimo faktu, że Meksyk (państwo) wprowadził obowiązek używania samochodowych reaktorów katalitycznych dopiero w 1994 roku [14]. W podobnych badaniach, przeprowadzonych parę lat później w Grecji, potwierdzono duże stężenie platynowców w próbkach gleby i kurzu w sąsiedztwie autostrad [15]. Również w kompleksowych badaniach przeprowadzonych na terenie Zachodniej Australii, wykazano wzrost stężenia platyny w próbkach środowiskowych [16].

W Niemczech w 1994 roku, 2 lata po wprowadzenia obowiązku montowania reaktorów katalitycznych w samochodach, zanotowano wzrost (z poziomu tła geochemicznego) wartości stężenia platyny do średnio  $46 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  gleby, natomiast w 1996 roku stężenia platyny w najwyższej warstwie gleby (0–2 cm) były średnio 4-krotnie wyższe (maksymalnie  $330 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) [17]. Wzrost ten wydaje się nadspodziewanie duży, biorąc pod uwagę krótki okres 2 lat, a spowodowany był wzrostem natężenia ruchu i stale wzrastającym udziałem samochodów wyposażonych w reaktory katalityczne zawierające platynowce. W przeciągu tego okresu zanotowano wkład około 3 mg platyny na długości 1 m drogi, co daje wielkość emisji rzędu  $0,27 \mu\text{g}/\text{km}/\text{samochód}$  [13]. Również w glebach Wielkiej Brytanii zaobserwowano podwyższone stężenia platyny w próbkach gleby z centrum miast i z pobliża głównych dróg w zakresie  $0,3\text{--}4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  [18].

Schafer i Puchelt [13] scharakteryzowali stężenie platynowców w glebach położonych blisko autostrad w południowo-zachodnich Niemczech. Stężenie platyny było kilkusetkrotnie większe w pobliżu jezdni, ale zmniejszało się gwałtownie i po 20 metrach stężenie PGM było bliskie wartości stężenia tła. Największe stężenia platynowców można spotkać w warstwie przypowierzchniowej od zera do 2 centymetrów. Mimo iż skażenie platynowcami terenów w pobliżu autostrad jest podobne do skażenia metalami ciężkimi, widoczne są różnice wynikające z:

- innego rozmiaru cząstek,
- innej mobilności w glebie,
- innego czasu trwania emisji.

Autorzy ci wskazują również na wpływ dominujących wiatrów na terenie badawczym, który może zmienić skumulowane wartości nawet o 30%. Jest to przyczyną powstawania lokalnych anomalii o dużej i małej wartości stężeń platynowców.

Z kolei Ely i in. [19] prezentowali wyniki badań próbek gleby i traw rosnących wzdłuż amerykańskich dróg. Stwierdzono podwyższone zawartości platyny ( $63\text{--}73$ ), palladu ( $18\text{--}31$ ) i rodu ( $3\text{--}7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Było to stężenie wyższe od tła glebowego i rozciągało się w pasie 50 metrów od jezdni. Według wyliczeń autorów powyższe stężenia platynowców zbliżają się do poziomu opłacalności ich odzyskiwania z zanieczyszczonej gleby. Wykazali również dodatnią korelację z metalami ciężkimi związanymi z ruchem samochodowym, takimi jak Ni, Cu i Zn oraz brak korelacji z pierwiastkami niezwiązanymi z ruchem ulicznym, na przykład z galem bądź itrem.

W badaniach przeprowadzonych wokół greckich dróg stwierdzono, że największe średnie stężenia platyny i palladu występowały w wierzchniej warstwie gleby przy autostradach (Pt –  $141,1$ ; Pd  $125,9 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) [15]. Przy drogach wiejskich i podmiejskich średnie stężenia są bliskie tła ( $0,4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) i wynoszą dla platyny –  $2,0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , a dla palladu –  $1,4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

W miastach średnie stężenia były o 35% mniejsze (93,5 oraz 80,7  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  odpowiednio Pt i Pd) w stosunku zawartości w próbkach glebowych z pobliza autostrad. Autorzy tłumaczą to zjawisko na dwa sposoby. Po pierwsze liczba samochodów, jaka się porusza na danym typie dróg (na autostradzie było ich o 25% więcej). Po drugie typ tych samochodów. Na autostradzie jeździ więcej samochodów ciężarowych, które spalając więcej paliwa na kilometr, produkują więcej spalin, a tym samym więcej cząstek uciekających platynowców. Drugim wyjaśnieniem jest wzrost ilości wydalananych spalin, a tym samym cząstek katalizatorów, w zależności od prędkości samochodów. Taka interpretacja jest zgodna z obowiązującą wiedzą [20].

## 5. Przekształcenie platynowców do form mobilnych

W literaturze mało jest informacji na temat długoterminowego oddziaływania małych ilości platynowców lub ich związków na glebę, gdyż podwyższone zawartości tychże metali zaczęły pojawiać się stosunkowo niedawno [21, 22].

Metale z grupy PGM są emitowane z katalizatorów samochodowych głównie w postaci metalicznej lub jako tlenki. Platynowce w formie metalicznej zachowywałyby się nieaktywnie, natomiast w formie katalitycznej są całkowicie rozdrobnione [23–25]. Ze względu na rozmiar cząstek pyłu w spalinach [24] oraz ze względu na różnorodne procesy chemiczne oddziałujące na platynowce, znaczące ilości tychże metali przekształcają się w formy biodostępne [26]. Frakcja biodostępna to głównie metal połączony w chloro-kompleksy lub kompleksy organiczne [21].

Sebek [27] stara się wyjaśnić działanie ligandów kompleksujących metale z grupy PGM. Ligandami tymi są różne substancje występujące w środowisku. Przeprowadzone badania polegały na wytrąsaniu wcześniej przygotowanego pyłu z naturalnie występującymi w środowisku substancjami, takich jak: pochodzące z nawozów fosforowych reszta kwasu ortofosforowego  $\text{PO}_4^{3-}$ , pozostałe po zimie resztki soli NaCl, kwas cytrynowy jako produkt wydzielania korzeni roślin oraz kwas fulwowy jako produkt naturalnego rozkładu celulozy i ligniny.

Kwas cytrynowy jest niskocząsteczkowym kwasem organicznym, powszechnie występującym w glebie jako substancja wydzielana przez korzenie roślin oraz strzępki grzybów. Jego stężenie w glebie mieści się w zakresie od 0,001 do 0,6 mola. Szczególnie dużo jest go w glebach organicznych oraz w glebach z bogatą kulturą grzybów [28–30].

Pirofosforan sodu  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  – zwany obojętnym lub czterosodowym [31]. Łagodny środek ekstrahujący stosowany w gleboznawstwie. Lustig i in. [32] twierdzą, że już 0,2 M roztwór tego związku potrafi uruchomić do 8% platyny zawartej w pyłach ulicznych.

Roztwór chlorku sodu (1 g/L) ma odpowiadać stężeniu tego związku w glebie przy drodze [33] po zastosowaniu soli przemysłowej do odśnieżania. Szczególnie, w środowisku kwaśnym, jony chlorkowe tworzą rozpuszczalne kompleksy z Pt i Pd [34].

Kwas fulwowy – FA (ang. *fulvic acid*) jest wielcząsteczkowym kwasem organicznym, który odgrywa znaczącą rolę w uruchamianiu metali ciężkich zawartych w glebie [35].

W opisanym eksperymencie [27] użyto katalizatorów z samochodów z silnikiem Diesla oraz napędzanych benzyną, jednego starszego a drugiego nowego. Starszy katalizator pochodził z pojazdu, który miał przejechane około 100 tys. kilometrów.

Napędzana benzyną nowa Skoda Octavia 1,8L, która daje emisję spalin na poziomie EU 4 posiadała reaktor katalityczny zawierający około 0,269 g platyny, 4,301 g palladu oraz 0,269 g rodu. Użyto również takiego samego modelu po przejechaniu 100 tysięcy kilometrów. W badaniach użyto również pojazdu napędzanego olejem napędowym. Pojazdem tym była Skoda Octavia 1,9L, spełniająca normy emisji EU 3. W modelu tym użyto reaktora katalitycznego zawierającego około 1,343 g platyny. Jak poprzednio użyto samochodu nowego oraz pojazdu po przejechaniu 100 tysięcy kilometrów. Następnie z każdego katalizatora przygotowano pył, który użyto do dalszych badań.

Próbka pyłu była wytrząsana z odpowiednim roztworem przez różną długość czasu: 1, 12, 24, 48, 168, 360, 720 i 1440 h. Dodatkowo przeprowadzono wytrząsanie w kwasie cytrynowym, buforowanym NaOH do pH: 3, 4, 5, 6, 7, 8 oraz 9. Tutaj wykorzystano nowy katalizator z samochodu napędzanego benzyną. Próbkę owinięto folią aluminiową by zapobiec fotoutlenianiu kwasu cytrynowego. Wytrząsanie trwało 1, 4, 24, 48 lub 168 h.

Po wykonaniu tak przygotowanych próbek oznaczono w nich: temperaturę, pH, Eh, przewodność właściwą oraz stężenie platyny i palladu.

Najsilniej na uruchamianie platyny i palladu oddziaływał roztwór kwasu cytrynowego oraz pirofosforanu sodu. Roztwór NaCl spotykany w środowisku nie miał większego wpływu na uruchamianie tych pierwiastków, jednak bardzo duże znaczenie ma pH roztworu. Dalsze badania będą miały na celu określenie zależności pomiędzy innymi substancjami zawartymi w glebie, takimi jak: materia organiczna, cząstki ilaste czy też glinokrzemiany, na które oddziaływano ligandami, a następnie oddziaływanie tak przekształconych substancji na procesy sorpcji i desorpcji platynowców.

Do podobnych wniosków w zakresie biotransformacji platynowców doszli Bowles i Gize [36]. W badaniach użyli folii wykonanych z platyny i palladu, które zanurzyli na rok w kwasach: fulwowym i huminowym. Eksperyment ten miał naśladować długotrwałe oddziaływanie gleby i rozkładającej się materii organicznej na PGM w pobliżu szlaków komunikacyjnych. Po roku przechowywania, w temperaturze pokojowej, w roztworach oznaczono do 195  $\mu\text{g/L}$  Pt i do 102  $\mu\text{g/L}$  Pd. Podobnie jak w opisanym wyżej eksperymencie do badań użyto platyny oraz palladu w postaci metalicznej. Platynowce w formie metalicznej mogą zatem w glebie być przekształcone do form biodostępnych.

Należy również pamiętać o tym, że oprócz transformacji platyny do form biodostępnych, jonowe formy ich związków wpływają na sorpcję lub desorpcję jonów innych metali. Szczególne zasługi w poznawaniu tych mechanizmów mają polscy uczeni [22]. Z badań tych wynika, że uruchamianie jonów innych metali zależy od:

- liczby wprowadzonych jonów platyny,
- czasu trwania doświadczenia,
- temperatury otoczenia.

Dodatkowo wynik takiego badania zależy od granulometrii gleby. Przykładowo dla gleby płowej wytworzonej na lessie wzrost zawartości jonów Pt(IV) miał istotne znaczenie dla zwiększenia zawartości jonów cynku Zn(II) w przesączu, natomiast dla gleby brunatnej wytworzonej na glinie, zwiększanie dawki platyny nie miało istotnego wpływu na desorpcję tych jonów. W tej samej glebie brunatnej równoczesny dodatek jonów platyny oraz jonów ołowiu lub kadmu wywoływał już taki efekt.

## 6. Inne źródła emisji platynowców do środowiska

Chociaż najważniejszym źródłem zanieczyszczenia platynowcami są spaliny silnikowe, mogą być one emitowane do środowiska także przez inne źródła, np. stosowane w przemyśle stacjonarne katalizatory stosowane do utleniania amoniaku [37].

Podwyższone zawartości platyny notuje się również w okolicach kopalń, szczególnie rud niklu, gdzie pierwiastek ten występuje jako domieszka, najczęściej w formie minerałów: sperylitu  $\text{PtAs}_2$  i kuperytu  $\text{PtS}$  [38].

Duże znaczenie, jako źródło zanieczyszczenia środowiska platyną, mają szpitale, szczególnie te z oddziałami chemioterapii. Przed wprowadzeniem taksoidów program zawierający analogi platyny był uznawany za standard w leczeniu zaawansowanego raka jajników. Jednym z ważniejszych analogów platyny – cisplatyna ( $\text{cis-}[\text{Pt}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2]$ ) – ma duże znaczenie w leczeniu nowotworów jąder i jajników, oraz nowotworów głowy i pęcherza moczowego (metoda wprowadzona w 1978 r.) [39]. Leczenie analogami platyny stanowi punktowe miejsca kontaminacji środowiska tym pierwiastkiem. W niektórych miejscach odpowiadają one nawet za 60% zawartości platyny w wodzie i osadach ściekowych [13].

W dobie wyczerpujących się źródeł paliw kopalnych, ogniwa paliwowe stają się istotnym elementem rozwoju źródeł energii odnawialnej. Ich wysoka wydajność oraz jakość pracy pozwala na wykorzystanie ogniw:

- w układach hybrydowych do napędzania pojazdów,
- w systemach zasilania awaryjnego,
- w przenośnych urządzeniach mobilnych.

W celu przyspieszenia pewnych procesów elektrochemicznych na elektrodach „napyla się” cząsteczki platyny [40–42]. W ich obecności wodór cząsteczkowy ulega rozerwaniu na atomy i jest utleniany do protonów. Celem obniżenia kosztów produkcji ogniw paliwowych stosuje się różne stopy platyny z metalami. Domieszkami do stopów mogą być: chrom, pallad, żelazo, rod, cyna, nikiel i tlenek wolframu [43, 44]. Przypuszczać można, że wraz z wprowadzeniem tej technologii do użytku masowego wzrośnie ilość zanieczyszczeń platynowcami, choć zagadnienie to nie zostało przebadane.

## 7. Wpływ platynowców na zdrowie człowieka

Jeszcze dwadzieścia lat temu najbardziej narażeni na działanie platynowców byli pracownicy rafinerii, zakładów chemicznych i jubilerskich oraz pracownicy szpitali, szczególnie oddziałów ginekologicznych oraz chemioterapii. U pracowników tych oddziałów stwierdzono podwyższone stężenie platyny we krwi [39].

Związki platynowców, w szczególności rozpuszczalne sole platyny są wysoce toksyczne, nawet w małych dawkach, a wiele z nich jest silnymi alergenami [45]. Z zanieczyszczonej gleby związki te dostają się do roślin, które stanowią pierwsze ogniwo łańcucha pokarmowego. W przebadanych w Australii produktach spożywczych zawartość platyny była zróżnicowana i wynosiła, przykładowo: 8,11  $\mu\text{g}/\text{kg}$  wątroby oraz 0,13  $\mu\text{g}/\text{L}$  mleka. Dzielne spożycie platyny dla mężczyzn oszacowano na poziomie 1,73  $\mu\text{g}/\text{dzień}$ , a dla kobiet 1,15  $\mu\text{g}/\text{dzień}$  (średnia 1,44  $\mu\text{g}/\text{dzień}$ ) [46]. Niestety do tej pory nie jest znany metabolizm platynowców w organizmie człowieka [24].

Turner i Price [34] przeprowadzili ekstrakcję zmielonych fragmentów katalizatorów w warunkach symulujących przewód pokarmowy człowieka. Dostępność PGE była relatywnie mała i wynosiła zaledwie kilka procent, ale zwiększała się w żołądku w miarę obniżenia pH i/lub wzrostu zawartości jonów chlorkowych oraz w miarę rozdrobnienia cząstek. Biodostępność PGM dodatkowo znacznie wzrosła po przeniesieniu badanego materiału do części symulującej pracę jelita. Biodostępność ołowiu zmieniała się podobnie jak PGM. Różnicą był stopień biodostępności, który w przypadku ołowiu wynosił prawie 80%. Wykonane przez autorów modele kinetyczne wskazują na różny stopień biodostępności PGM. Rod był prawie 4-krotnie, a pallad 2-krotnie bardziej biodostępny niż platyna (współczynniki odpowiednio: 0,068, 0,031, 0,015  $\mu\text{g/L}$ ). Biodostępność PGE wydaje się być kontrolowana przez szybkość rozpuszczania metalicznych cząstek w żołądku oraz przez kinetykę powstawania i rozpuszczania się nieorganicznych związków tych metali, takich jak chlorki czy hydroksychlorki, oraz kompleksów organicznych o niezdefiniowanej budowie.

W innych badaniach [46] wykazano znaczący wychwyty platyny z jelit. Autorzy tej pracy przebadali 21 dorosłych mieszkańców Sydney (Australia). Określono zawartość platyny we krwi, moczu oraz kale badanych osób. Zawartość platyny we krwi wynosiła 0,56  $\mu\text{g/L}$ , w moczu 0,18  $\mu\text{g/L}$  (0,23  $\mu\text{g/g}$  kreatyniny), w kale 10,5  $\mu\text{g/kg}$ . Zatem dzienne wydalanie platyny z moczem oceniono na 0,76–1,07  $\mu\text{g/dzień}$ , a z kałem na 0,61–0,73  $\mu\text{g/dzień}$ . Wychwyty platyny z jelit oceniono na 42% całkowitego pobrania.

## 8. Wnioski

Transport jako jeden z ważniejszych działów gospodarki nadal będzie się rozwijał. Przez wzrastającą liczbę pojazdów oraz budowanie dróg dział ten ma coraz większy wpływ na nasze otoczenie oraz zdrowie. Szczególny wpływ wywiera na środowisko poprzez emisję toksycznych spalin. Użycie katalizatorów rozwiązało ten problem, zmniejszając zawartość szkodliwych substancji o 80–90%. Katalizatory samochodowe z jednej strony redukują zanieczyszczenia w spalinach lecz z drugiej same negatywnie oddziałują na środowisko. Dostarczane wraz ze spalinami platynowce są pierwiastkami nierozpowszechnionymi w środowisku, i poza miejscem ich nagromadzenia, nie występują w ilościach przekraczających 1  $\mu\text{g/kg}$  (1 ppb). Ich nagromadzenie w glebie, transformacja do form biodostępnych oraz wzrost zawartości w produktach żywnościowych mogą budzić obawy, które mogą być rozwiane (lub potwierdzone) analizami oddziaływania platynowców na różne elementy środowiska.

## Literatura

- [1] GUS 2012, *Mały Rocznik Statystyczny Polski*, Warszawa 2012.
- [2] *Karta charakterystyki niebezpiecznego preparatu: benzyna bezolowiowa*. BP Polska10.09.2004 ([http://www.bp.com/liveassets/bp\\_internet](http://www.bp.com/liveassets/bp_internet) – dostęp na dzień 14.09.2012).
- [3] Bocheński C., Bocheńska A., *Olej rzepakowy paliwem do silników diesla*, Czasopismo Techniczne 8-M/2008, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2003.
- [4] GUS Transport 2011, *Transport – wyniki działalności*, Warszawa 2012.



- [5] Jaroszek M., Wieszała R., *Wpływ prędkości pojazdu na wielkość emisji spalin na miejskim odcinku drogowym*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Transport z. 70, nr kol. 1835, 2011, 37-44.
- [6] Syczewska K., Musialik-Piotrowska A., Mendyka B., Sikora A., *Wpływ dodatków stabilizujących na aktywność katalizatorów do dopalania zanieczyszczeń w gazach spalinowych*, Ochrona Środowiska, 1996, 29-32.
- [7] Penconek A., Moskal A., *Budowa stanowiska do generowania i analizy spalin z wysokoprężnego silnika Diesla*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 1(49), 2010, 83-84.
- [8] Ntziachristos L., Samaras Z., *EMEP/EEA emission inventory guidebook*, Ateny 2009.
- [9] Strona internetowa: Europa.eu ([http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/air\\_pollution/128186\\_pl.html](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/128186_pl.html) – dostęp 14.09.2012).
- [10] Lucena P., Vadillo J. M., Laserna J., *Mapping of platinum group metals in automotive exhaust threeway catalysts using laser-induced breakdown spectrometry*, Anal. Chem., 71, 1999, 4385-4391.
- [11] Kaspar J., Fornasiero P., Hickey N., *Automotive catalytic converters: current status and some perspectives*, Catalysis Today, 77, 2003, 419-449.
- [12] Strona internetowa: Autokatalizatory (<http://www.autokatalizatory.pl/badania-katalizatorow-kat-handel-auto-katalizatory,795.html>, dostęp na dzień 18.09.2012).
- [13] Schafer J., Puchelt H., *Platinum-Group-Metals (PGM) emitted from automobile catalytic converters and their distribution in roadside soils*, Journal of Geochemical Exploration 64, 1998, 307-314.
- [14] Morton O., Puchelt H., Hernandez E., Lounejeva E., *Traffic-related platinum group elements (PGE) in soils from Mexico City*, J. Geochem. Explor. 72, 2001, 223-227.
- [15] Riga-Karandinos A.N., Saitanis C.J., Arapis G., *First study of anthropogenic platinum group elements in roadside top-soils in Athens, Greece*, Water, Air and Soil Pollution, 172, 2005, 3-20.
- [16] Whiteley J. D., Murray F., *Anthropogenic platinum group elements (Pt, Pd and Rh) concentrations in road dusts and roadside soils from Perth, Western Australia*, Sci. Tot. Environ. 317, 121-135, 2003.
- [17] Heinrich F., Schmidt G., Kratz K.L., *Determination of platinum group elements (PGE) from catalytic converters in soil by means of docimasy and INAA*, Fres. J. Anal. Chem., 354, 1996, 883-885.
- [18] Farago M.E., Kavanagh P., Blanks R., Kelly J., Kazantzis G., Thornton I., Simpson P.R., Cook J.M., Delves H.T., Hall G.M., *Platinum concentration in urban road dust and soil, and in blood and urine in the United Kingdom*, Analyst, 123, 1998, 451-454.
- [19] Ely J.C., Neal C.R., Kulpa C.F., Schneegurt M.A., Seidler J.A., Jain J.C., *Implications of Platinum-Group Element accumulation along US roads from catalytic-converter attrition*, Environ. Sci. Technol., 35, 2001, 3816-3822.
- [20] Zereini F., Skerstupp B., Rankenburg K., Dirksen F., Beyer J.M., Claus T., Urban H., *Anthropogenic Emission of Platinum-group Elements into the Environment*, J. Soils & Seclirments, 1, 2001, 44-49.



- [21] Palacios M.A., Gómez M.M., Moldovan M., Morrison G., Rauch S., Mcleod C., Ma R., Laserna J., Lucena P., Caroli S., Alimonti A., Petrucci F., Bocca B., Schramel P., Lustig S., Zischka M., Wass U., Stenbom B., Luna M., Saenz J.C., Santamaria J., Torrens J.M., *Platinum-group elements: quantification in collected exhaust fumes and studies of catalyst surfaces*, Sci. of The Total Environ., 257(1), 2000, 1-15.
- [22] Bojanowska M., *Wpływ temperatury i stężenia jonów Pt(IV), Cd(II) i Pb(II) na desorpcję jonów cynku (II) w glebach mineralnych*, Annales UMCS, Sec. E, Lublin, 59, 3, 1007-1014.
- [23] Artelt S., Kock H., Nachtigall D., Heinrich U., *Bioavailability of platinum emitted from automobile exhaust*, Toxicol Lett., v. 96-97, 1998, 163-167.
- [24] Artelt S., Creutzenberg O., Kock H., Levsen K., Nachtigall D., Heinrich U., Rühle T., Schlögl R., *Bioavailability of fine dispersed platinum as emitted from automotive catalytic converters: a model study*, Sci. Total Environ., 228(2-3), 1999, 219-242.
- [25] Nachtigall, D., Kock, H., Artelt, S., Levsen, K., Wunsch, G., Rühle, T., Schlögl, R., *Platinum solubility of a substance designed as a model for emissions of automobile catalytic converters*, Fresenius J. Anal. Chem. 354, 1996, 742-746.
- [26] Lustig S., Zang S., Michalke B., Schramel B., Beck W., *Transformation behaviour of different platinum compounds in a clay-like humic soil: speciation investigations*. Sci. Total Environ. 188, 1996, 195-204.
- [27] Sebek O., Mihaljevic M., Strnad L., Ettler V., Jezek J., Stedry R., Drahota P., Ackerman L., Adamec V., *Dissolution kinetics of Pd and Pt from automobile catalysts by naturally occurring complexing agents*, Journal of Hazardous Materials, 198, 2011, 331-339.
- [28] Strobel B.W., *Influence of vegetation on low-molecular-weight carboxylic acids in soil solution—a review*, Geoderma, 99, 2001, 169-198.
- [29] Ettler V., Komarkova M., Jehlicka J., Coufal P., Hradil D., Machovic V., Delorme F., *Leaching of lead metallurgical slag in citric solutions—implications for disposal and weathering in soil environments*, Chemosphere, 57, 567-577, 2004.
- [30] Gadd G.M., *Heterotrophic solubilization of metal-bearing minerals by fungi*, in: Cotter-Howells J.D., Campbell L.S., Valsami-Jones E., Batchelder M., (Eds.), *Environmental Mineralogy: Microbial Interaction, Anthropogenic Influences, Contaminated Land and Waste Management*, Mineralogical Society Series 9, Mineralogical Society, London 2000, 57-75.
- [31] Makara A., Wzorek Z., Banach M., *Pirofosforan sodu – właściwości fizyko-chemiczne, zastosowanie i metody produkcji*, Czasopismo Techniczne z. 1-Ch/2009, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2009.
- [32] Lustig S., Zang S., Beck W., Schramel P., *Dissolution of Metallic Platinum as Water Soluble Species by Naturally Occurring Complexing Agents*, Mikrochim, Acta, 129, 1998, 189-194.
- [33] Backstrom M., Karlsson S., Backman L., Folkesson L., Lind B., *Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment*, Water Research, 38, 2004, 720-732.
- [34] Turner A., Price S., *Bioaccessibility of platinum group elements in automotive catalytic converter particulates*, Environ. Sci. Technol., 42, 2008, 9443-9448.

- [35] Wood S.A., *The interaction of dissolved platinum with fulvic acid and simple organic acid analogues in aqueous solutions*, Canadian Mineralogist, 28, 1990, 665-673.
- [36] Bowles J.F.W., Gize A.P., *A preliminary study of the release of platinum and palladium from metallic particles in the surface environment by organic acids: relevance weathering of particles from vehicle exhaust catalyst*, Mineral. Mag., 69, 2005, 687-693.
- [37] Hofman M., Wachowski L., *Badania zawartości platyny i ołowiu w glebie wzdłuż głównych dróg wylotowych z Poznania*, Ochrona Środowiska, 32(3), 2010, 43-47.
- [38] Kabata-Pendias A., Pendias H., *Biogeochemia pierwiastków śladowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [39] Potemski P., Jaworski T., Płużańska A., *Postępowanie u chorych na zaawansowanego raka jajnika – część II. Rola leczenia systemowego*, Onkol. Pol., 5, 3-4, 2002, 159-165.
- [40] Lamy-Pitera E., Barbier J., *Platinum modified by electrochemical deposition of atoms*, Applied Catalysis A, General, vol. 149, 1997, 49-87.
- [41] Jiang J., Kucernak A., *Investigations of fuel cell reactions at the composite microelectrode|solid polymer electrolyte interface. I. Hydrogen oxidation at the nanostructured Pt/Nafion membrane interface*, J. Electroanal. Chem., vol. 567, 2004, 123.
- [42] Li W., Zhou W., Li H., Zhou Z., Zhou B., Sun G., Xin Q., *Nano-structured Pt-Fe/C as cathode catalyst in direct methanol fuel cell*, Electrochim. Acta, 49, 2004, 1045-1055.
- [43] Włodarczyk R., Kolary-Żurowska A., Marasii R., Chojak M., Kulesza P.J., *Enhancement of oxygen reduction by incorporation of heteropolytungstate into the electrocatalytic ink of carbon supported platinum nanoparticles*, Electrochimica Acta, 52, 2007, 3958-3964.
- [44] Chojak M., Kolary-Żurowska A., Włodarczyk R., Miecznikowski K., Karnicka K., Pałys B., Marassi R., Kulesza P. J., *Modification of Pt nanoparticles with polyoxometallate monolayers: Competition between activation and blocking of reactive sites for the electrocatalytic oxygen reduction*, Electrochimica Acta, 52, 2007, 5574.
- [45] Niezborala M., Garnier R., *Allergy to complex platinum salts: a historical prospective cohort study*, Occupational and Environmental Medicine, 53, 1996, 252-257.
- [46] Vaughan G.T., Florence T.M., *Platinum in the human diet, blood, hair and excreta*. Sci. Total Environ., 111, 1992, 47-58.

PIOTR DULIAN\*, KRYSZYNA WIECZOREK CIUROWA\*, WOJCIECH BĄK\*\*,  
CZESŁAW KAJTOCH\*\*\*

## MOŻLIWOŚCI WYTWARZANIA ZAAWANSOWANEJ ELEKTROCERAMIKI NA BAZIE TYTANIANU BARU METODĄ MECHANOCHEMICZNĄ

---

### TOWARDS PRODUCTION OF ADVANCED BARIUM TITANATE ELECTROCERAMICS BY MECHANOCHEMICAL SYNTHESIS

---

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono mechanochemiczną syntezę jako alternatywę w stosunku do tradycyjnych, wysokotemperaturowych metod wytwarzania zaawansowanych ceramicznych materiałów elektrotechnicznych o strukturze perowskitu. Wykazano, iż mechanochemiczna synteza jest również skuteczną metodą modyfikacji właściwości  $\text{BaTiO}_3$  poprzez substytucyjne podstawienie obcych jonów. Określono również właściwości otrzymanych roztworów stałych.

*Słowa kluczowe: mechanochemia, wysokoenergetyczne mielenie, struktura perowskitu, ceramika ferroelektryczna, tytanian baru*

#### Abstract

This paper considers mechanochemical synthesis as an alternative to the conventional, high-temperature method of manufacturing advanced electrical ceramic materials with a perovskite structure. Mechanochemical synthesis is also presented as an effective method for modifying the properties of  $\text{BaTiO}_3$  by substitution of foreign ions, and the effect of such substitution on the properties of the solid solutions is also discussed.

*Keywords: mechanochemistry, high-energy milling, perovskite structure, ferroelectric ceramics, barium titanate*

---

\* Mgr Piotr Dulian, prof. dr hab. Krystyna Wieczorek-Ciurowa, Instytut Chemii i Technologii Nieorganicznej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

\*\* Dr Wojciech Bąk, dr hab. Czesław Kajtoch prof. UP, Instytut Fizyki, Wydział Matematyczno-Fizyczno-Techniczny, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie.

## 1. Wstęp

Obserwowany w ostatnich dziesięcioleciach intensywny rozwój szeroko pojętej techniki nie byłby możliwy, gdyby nie osiągnięcia w dziedzinie inżynierii materiałowej. Technologia wytwarzania na skalę przemysłową różnych typów materiałów funkcjonalnych, w szczególności ceramicznych, ze względu na bardzo wysokie temperatury topnienia substratów, opiera się obecnie w głównej mierze na reakcjach zachodzących między ciałami stałymi [1]. Zagadnienia mechanizmu tego typu reakcji ze względu na ich ogromne znacznie technologiczne stały się więc priorytetowe we współczesnej chemii. Stanowią one bowiem podstawę procesów w przemyśle metalurgicznym, ceramicznym i wielu innych gałęziach współczesnej technologii. Na reakcjach między ciałami stałymi oparta jest produkcja zaawansowanych materiałów półprzewodnikowych, ferroelektrycznych i magnetycznych, bez których niemożliwy byłby rozwój współczesnej elektroniki.

Reakcje te, mimo że zachodzą między ciałami stałymi (bez topienia składników) wymagają wysokich temperatur w zależności od typu materiału, często ponad 1000°C. Przeprowadzenie takich syntez w skali przemysłowej stwarza wiele trudności natury technologicznej. Ze względu na niską dyfuzję w ciałach stałych procesy te są też czaso- i energochłonne [2].

Wobec kończących się zasobów naturalnych, droższej energii oraz kosztów pracy, nieustannie poszukuje się sposobów racjonalizacji procesów wytwórczych, mając również na uwadze wysoką jakość produktów. Ma to szczególne znaczenie w przypadku elektroceramiki. Jako alternatywne w stosunku do klasycznej wysokotemperaturowej syntezy w ciele stałym, na przestrzeni lat opracowano wiele sposobów wytwarzania wysokiej jakości ceramiki użytkowej, m.in. metodę zol-żel [3], hydrotermalną [4, 5], współstrącaniową [6]. Umożliwiają one w dużym stopniu kontrolowanie morfologii ziaren wytwarzanej ceramiki, co jest niewątpliwie ogromną ich zaletą. Ze względu na stopień złożoności, drogą specjalistyczną aparaturę, z technologicznego punktu widzenia nie są one jednak atrakcyjne. Konieczność stosowania metaloorganicznych substratów oraz rozpuszczalników sprawia, iż są one dodatkowo uciążliwe dla środowiska naturalnego.

Metodą stwarzającą szerokie perspektywy technologicznego wykorzystania jest mechanochemiczna synteza [7, 8]. Podstawową zaletą metody jest jej prostota, polega ona na mieleniu materiałów w wysokoenergetycznych urządzeniach mielących. Energia mechaniczna podczas tego procesu jest dostarczana do materiału mielonego i akumulowana w nim w postaci naprężeń sieci krystalicznej. Prowadzi to, oprócz dużego rozdrobnienia, do generowania wielu zmian strukturalnych, takich jak np. tworzenie się defektów, dyslokacji, a nawet amorfizacji.

Duże rozdrobnienie materiału, aż do skali nano oraz mocne zdefektowanie struktury krystalicznej w połączeniu z dostarczaną podczas mielenia energią mechaniczną sprawia, iż w temperaturze pokojowej zachodzą reakcje chemiczne, które w standardowych warunkach wymagają wysokiej temperatury, np. ponad 1000°C. Produkty syntez charakteryzują się ponadto często unikatowymi właściwościami w porównaniu z ich „konwencjonalnymi” odpowiednikami. Możliwe jest też wytworzenie materiałów, których nie można uzyskać innymi metodami, np. mocno przesyconych roztworów stałych.

Procesy mechanochemiczne w pełni spełniają założenia *zielonej chemii*. W porównaniu z innymi metodami wytwarzania materiałów funkcjonalnych, ich zaletą jest prostota i jednoetapowość procesu. Syntezy te nie generują odpadów, gdyż nie stosuje się w nich rozpusz-

czalników, a materiałami wyjściowymi są głównie nieuciążliwe dla środowiska naturalnego proszki substancji nieorganicznych, np. tlenki czy metale.

Technika wysokoenergetycznego mielenia stosowana jest obecnie z powodzeniem do wytwarzania wielu zaawansowanych materiałów funkcjonalnych, takich jak: stopy międzymetaliczne, kompozyty, katalizatory oraz materiały ceramiczne o szerokim zakresie właściwości [9–11].

Wśród ceramicznych materiałów elektrotechnicznych najbardziej znany jest posiadający strukturę typu perowskitu, tytanian baru. Niezwykła różnorodność i specyfika zjawisk oraz właściwości ferroelektryczne sprawiają, iż jest on szeroko wykorzystywany w wielu dziedzinach współczesnej techniki. W czystej postaci  $\text{BaTiO}_3$ , ze względu na występującą w nim ostrą przemianę ferroelektryczną, jest rzadko stosowany w przemyśle. Jednak podstawiając w miejsce jonów  $\text{Ba}^{2+}$  i/lub  $\text{Ti}^{4+}$  inne jony o podobnych promieniach jonowych oraz odpowiedniej koncentracji, można sterować właściwościami  $\text{BaTiO}_3$ , dobierając je do konkretnego zastosowania, co znacznie poszerza możliwości jego aplikacji technologicznych [12].

Różnego rodzaju roztwory stałe na bazie tytanianu baru wytwarza się obecnie na skalę przemysłową metodą wysokotemperaturowej syntezy w ciele stałym, polegającą na długotrwałym ogrzewaniu mieszaniny odpowiednich substratów w temperaturze około  $1350^\circ\text{C}$  [13].

Związki o strukturze typu perowskitu można również wytworzyć metodą mechanochemicznej syntezy [14, 15]. Wysokoenergetyczne mielenie substratów jest jednak wykorzystywane w celu aktywacji mieszaniny proszków, zaś krystaliczną fazę związku otrzymuje się po dalszej wysokotemperaturowej obróbce. Kalcynacja jest jednak prowadzona w znacznie niższych temperaturach (około  $800\text{--}900^\circ\text{C}$ ) i przez krótszy czas.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie mechanochemicznej syntezy jako jednoetapowej metody wytwarzania zaawansowanych ceramicznych materiałów elektrotechnicznych na bazie tytanianu baru.

Udowodniono, że w stosunkowo krótkim czasie i temperaturze pokojowej można na skutek wysokoenergetycznego mielenia doprowadzić do syntezy w fazie stałej tytanianu baru oraz modyfikować go przez substytucyjne podstawienie różnej liczby jonów  $\text{Sr}^{2+}$  oraz  $\text{Ca}^{2+}$  w podsić barową tytanianu baru.

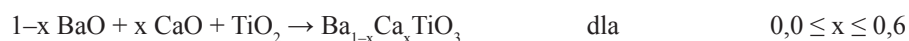
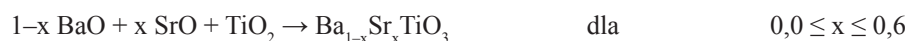
Zaprezentowano również wpływ takiej modyfikacji na wielkość powierzchni właściwej proszku.

## 2. Część doświadczalna

### 2.1. Materiały i procedury syntez mechanochemicznych

Materiałami wyjściowymi były następujące tlenki: BaO (Sigma Aldrich, tech. 90,0%,  $M = 153,33$  g/mol),  $\text{TiO}_2$  (Evonik Degussa P25 GmbH, cz.d.a. 98,0%,  $M = 79,90$  g/mol), SrO (Alfa Aesar, tech. 90,0%,  $M = 103,62$  g/mol), CaO (POCH S.A. cz.d.a. 98,0%,  $M = 56,08$  g/mol).

Modyfikacji  $\text{BaTiO}_3$  na drodze mechanochemicznej obróbki dokonano poprzez substytucyjne podstawienie różnej ilości jonów  $\text{Sr}^{2+}$  oraz  $\text{Ca}^{2+}$  w miejsce  $\text{Ba}^{2+}$ , według reakcji:



Odważone stechiometrycznie do danego składu ilości tlenków mieszano ręcznie w agatowym moździerz w celu otrzymania homogenicznej mieszaniny proszków. Tak przygotowane mieszaniny fizyczne poddano mechanochemicznej obróbce w wysokoenergetycznym planetarnym młynie kulowym Activator 2S (Novosibirsk Corp. Rosja). Mielenia prowadzono w temperaturze pokojowej i suchym środowisku w atmosferze powietrza. Użyto reaktora o pojemności 250 ml i mielników o średnicy 10 mm ze stali Cr - Ni. Zastosowano następujące parametry: liczba obrotów na minutę, rpm = 1100, stosunek mas mielników do materiału mielonego, BPR = 40:1. Czas mielenia: 1,5 godziny.

## 2.2. Charakterystyka otrzymanych materiałów

Produkty syntez analizowano metodą proszkowej dyfrakcji rentgenowskiej, stosując promieniowanie  $\text{CuK}_\alpha$  (dyfraktometr X'Pert Philips) w zakresie kątów  $2\theta$  10–90° przy wielkości kroku 0,01°. Do identyfikacji faz posłużono się tablicami JCPDS.

Analizę rozkładu wielkości cząstek stałych wykonano, stosując laserową dyfrakcję za pomocą aparatu 22 MicroTec plus firmy Fritsch GmbH.

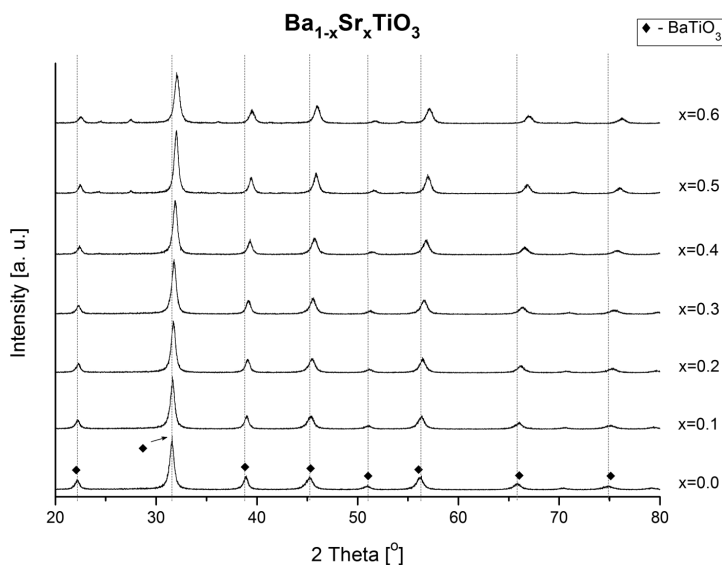
Wielkość powierzchni właściwej proszku wyznaczono, stosując metodę izotermy adsorpcji fizycznej BET (nazw. Brunauera, Emmetta i Tellera). Pomiaru wykonano z użyciem urządzenia ASAP 2020 – Accelerated Surface Area and Porosimetry Analyzer firmy Micromeritics.

## 3. Wyniki badań

### 3.1. Mechanochemiczne modyfikowanie tytanianu baru jonami strontu

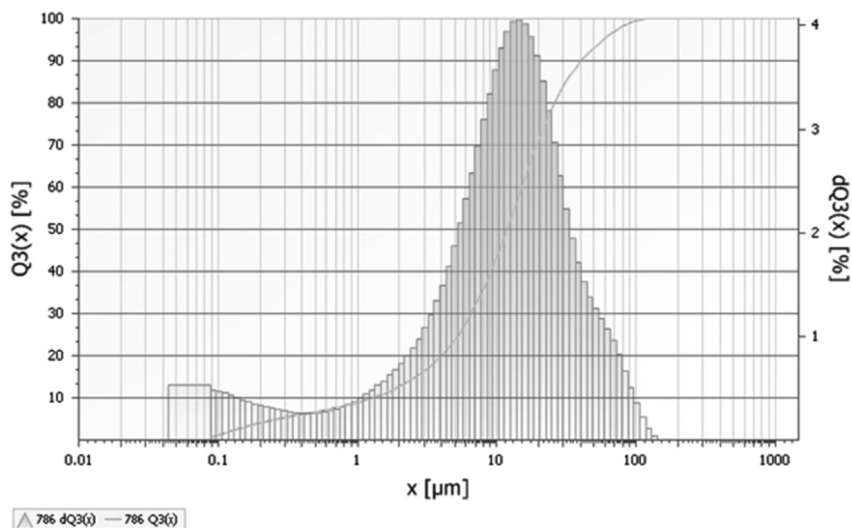
Dzięki podobnym rozmiarom jonów  $\text{Sr}^{2+}$  i  $\text{Ba}^{2+}$  tworzy się ciągły szereg roztworów stałych  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  w całym badanym zakresie koncentracji jonów  $\text{Sr}^{2+}$ , co ilustruje rys. 1. Tworzenie się odpowiednich roztworów stałych potwierdza monofazowy układ we wszystkich przypadkach oraz nieduże przesunięcia głównych refleksów dyfrakcyjnych  $\text{BaTiO}_3$  w kierunku wyższych wartości kątowych  $2\theta$ .

Analiza rozkładu wielkości cząstek dla próbki o największym stopniu podstawienia (rys. 2) wykazała, iż podobnie jak w przypadku czystego  $\text{BaTiO}_3$ , główną frakcją stanowią cząstki o rozmiarze ziaren ok. 10  $\mu\text{m}$ . Uzyskane w ten sposób dane należy interpretować, biorąc pod uwagę fakt, iż cząstki wytworzone mechanochemicznie mają dużą tendencję do aglomeracji, zaburzając w ten sposób dane o wielkości rozmiaru ziaren. Potwierdzeniem tej tezy są duże wartości połówkowych szerokości głównych refleksów dyfrakcyjnych otrzymanych faz (rys. 1) świadczące o dużym rozdrobieniu oraz zmierzona metodą BET wartość powierzchni właściwej (tabela 1). Wielkość powierzchni właściwej na skutek dopowiania zwiększa się z 7,16  $\text{m}^2/\text{g}$  dla czystego  $\text{BaTiO}_3$  do 51,57  $\text{m}^2/\text{g}$  dla  $\text{Ba}_{0,4}\text{Sr}_{0,6}\text{TiO}_3$ .



Rys. 1. Zestawienie dyfraktogramów rentgenowskich XRD proszków  $\text{BaTiO}_3$  oraz roztworów stałych  $\text{BaTiO}_3\text{-SrTiO}_3$

Fig. 1. XRD patterns of mechanochemically synthesized  $\text{BaTiO}_3$  and  $\text{BaTiO}_3\text{-SrTiO}_3$  solid solutions powders



Rys. 2. Rozkład wielkości cząstek mechanochemicznie wytworzonego roztworu stałego  $\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3$

Fig. 2. The particle size distribution of mechanochemically-synthesized solid solution  $\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3$



Tabela 1

**Wartości wielkości powierzchni właściwej BET mechanochemicznie wytworzonych proszków BaTiO<sub>3</sub> oraz jego modyfikacji jonami strontu**

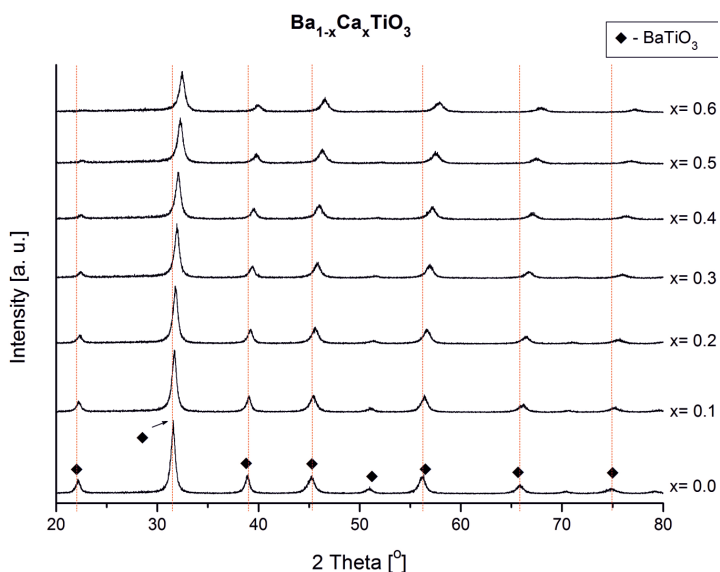
| Nazwa  | S <sub>BET</sub> [m <sup>2</sup> /g] |
|--|--------------------------------------|
| BaTiO <sub>3</sub>                                   | 7.16                                 |
| Ba <sub>0,9</sub> Sr <sub>0,1</sub> TiO <sub>3</sub> | 10.29                                |
| Ba <sub>0,8</sub> Sr <sub>0,2</sub> TiO <sub>3</sub> | 19.52                                |
| Ba <sub>0,7</sub> Sr <sub>0,3</sub> TiO <sub>3</sub> | 16.99                                |
| Ba <sub>0,6</sub> Sr <sub>0,4</sub> TiO <sub>3</sub> | 34.99                                |
| Ba <sub>0,5</sub> Sr <sub>0,5</sub> TiO <sub>3</sub> | 47.32                                |
| Ba <sub>0,4</sub> Sr <sub>0,6</sub> TiO <sub>3</sub> | 51.57                                |

### 3.2. Mechanochemiczne modyfikowanie tytanianu baru jonami wapnia

Zastosowanie jonów Ca<sup>2+</sup> jako modyfikatora BaTiO<sub>3</sub> również prowadzi do tworzenia się roztworów stałych w badanym zakresie koncentracji wapnia (rys. 3). Uzyskane wyniki są w tym przypadku dyskusyjne w stosunku do danych literaturowych, gdzie z powodu dużych różnic rozmiarów jonów Ca<sup>2+</sup> i Ba<sup>2+</sup> oraz innej symetrii krystalicznej tytanianów wapnia i baru, obserwuje się tworzenie ograniczonego szeregu roztworów stałych [16–18]. Niejednokrotnie jednak stosując mechanochemiczną syntezę, uzyskiwano niekonwencjonalne, mocno przesycone roztwory stałe [19].

Główną frakcją proszków stanowią cząstki o średnim rozmiarze 10 μm, ale w analogii do poprzednich proszków zaburzenie pomiarów może być powodowane przez tworzenie się aglomeratów (rys. 4). Powierzchnia właściwa wytworzonych roztworów stałych w przeciwieństwie do układów BaTiO<sub>3</sub>-SrTiO<sub>3</sub>, nie zmienia się istotnie wraz ze wzrastającą koncentracją jonów Ca<sup>2+</sup> (tabela 2). Zjawisko to wymaga wyjaśnienia.





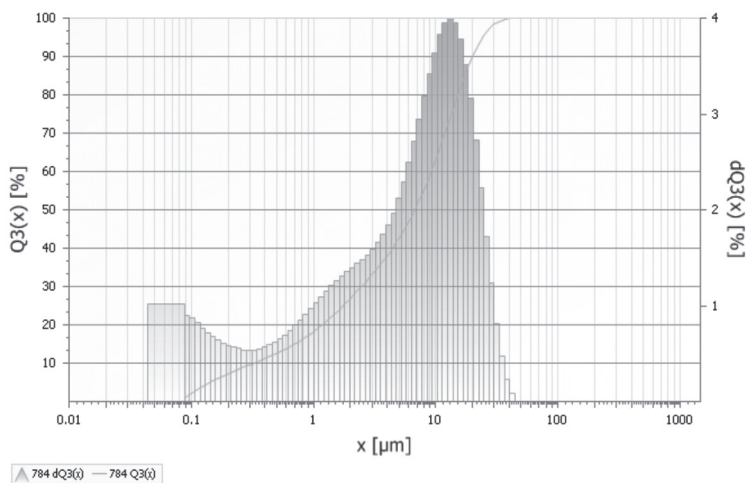
Rys. 3. Zestawienie dyfraktogramów rentgenowskich XRD proszków  $BaTiO_3$  oraz roztworów stałych  $BaTiO_3$ - $CaTiO_3$

Fig. 3. XRD patterns of mechanochemically synthesized  $BaTiO_3$  and  $BaTiO_3$ - $CaTiO_3$  solid solutions powders

Tabela 2

Wartości wielkości powierzchni właściwej BET mechanochemicznie wytworzonych proszków  $BaTiO_3$  oraz jego modyfikacji jonami wapnia

| Nazwa                   | $S_{BET}$ [m <sup>2</sup> /g] |
|-------------------------|-------------------------------|
| $BaTiO_3$               | 7.16                          |
| $Ba_{0.9}Ca_{0.1}TiO_3$ | 6.96                          |
| $Ba_{0.8}Ca_{0.2}TiO_3$ | 7.41                          |
| $Ba_{0.7}Ca_{0.3}TiO_3$ | 7.34                          |
| $Ba_{0.6}Ca_{0.4}TiO_3$ | 5.36                          |
| $Ba_{0.5}Ca_{0.5}TiO_3$ | 6.16                          |
| $Ba_{0.4}Ca_{0.6}TiO_3$ | 4.36                          |



Rys. 4. Rozkład wielkości cząstek mechanochemicznie wytworzonego roztworu stałego  $\text{Ba}_{0.4}\text{Ca}_{0.6}\text{TiO}_3$

Fig. 4. The particle size distribution of mechanochemically-synthesized solid solution  $\text{Ba}_{0.4}\text{Ca}_{0.6}\text{TiO}_3$

#### 4. Podsumowanie

Wyniki prac wskazują na możliwości wytwarzania zaawansowanych ceramicznych materiałów elektrotechnicznych o strukturze typu perowskitu. Materiały cechują się dużym rozdrobnieniem, mając tendencję do tworzenia się aglomeratów. Można je ograniczyć, stosując np. procesy mielenia w różnych środowiskach (dyspergatorach).

#### Literatura

- [1] Martin M., Tigelmann P., Schimschal-Thölke S., Schulz G., *Solid state reactions and morphology*, Solid State Ionics, 75, 1995, 219-228.
- [2] Lotnyk A., Graff A., Senz S., Zakharov N.D., Hesse D., *Topotaxial formation of titanium-rich barium titanates during solid state reactions on (100)  $\text{TiO}_2$  (rutile) and (001)  $\text{BaTiO}_3$  single crystals*, Solid State Sciences, 10, 2008, 702-708.
- [3] Frey M.H., Payne D.A., *Nanocrystalline barium titanate: Evidence for the absence of ferroelectricity in sol-gel derived thin-layer capacitors*, Applied Physics Letters, 63, 1993, 2753-2755.
- [4] Lei J.-X., Liu X.-L., Chen J.-F., *Hydrothermal synthesis and structure characterization of nanocrystalline barium titanate powders*, Advanced Materials Research, 11-12, 2006, 23-26
- [5] Testino A., Buscaglia V., Buscaglia M.T., Viviani M., Nanni P., *Kinetic modeling of aqueous and hydrothermal synthesis of barium titanate ( $\text{BaTiO}_3$ )*, Chemistry of Materials, 17, 2005, 5346-5356.

- [6] Xu H., Gao L., *New evidence of a dissolution-precipitation mechanism in hydrothermal synthesis of barium titanate powders*, Materials Letters, 57, 2002, 490-494.
- [7] Boldyrev V.V., Tkáčová K., *Mechanochemistry of solids: Past, present and prospects*, Journal of Materials Synthesis and Processing, 8(3-4), 2000, 121-132.
- [8] Gilman J.J., *Mechanochemistry*, Science, 39, 1996, 65.
- [9] Garay A.L., Pichon A., James S.L., *Solvent-free synthesis of metal complexes*, CrystEngComm, 8, 2007, 846-855.
- [10] Wieczorek-Ciurowa K., Rakoczy J., Błońska-Tabero A., Filipek E., Nizioł J., Dulian P., *Mechanochemical synthesis of double vanadate in Cu-Fe-V-O system and its physicochemical and catalytic properties*, Catalysis Today, 176, 2011, 314-317.
- [11] Wieczorek-Ciurowa K., Dulian P., Bąk W., Kajtoch C., *Modyfikacja właściwości elektrycznych  $\text{CaTiO}_3$  metodą wysokoenergetycznego mielenia jako przykład zielonej chemii*, Przemysł Chemiczny, 90, 2011, 1400-1403.
- [12] Johnson C.J., *Some dielectric and electro-optic properties of  $\text{BaTiO}_3$  single crystals*, Applied Physics Letters, 7, 1965, 221-223.
- [13] Niepce J.C., Thomas G., *About the mechanism of the solid-way synthesis of barium metatitanate. Industrial consequences*, Solid State Ionics, 43, 1990, 69-76.
- [14] Phule P.P., Risbud S.H., *Low-temperature synteheis and processing of electronic materials in the  $\text{BaO-TiO}_2$  system*, Journal of Materials Science, 25, 1990, 1169-1183.
- [15] Kong L.B., Ma J., Huang H., Zhang R.F., Que W.X., *Barium titanate derived from mechanochemically activated powders*, Journal of Alloys and Compounds, 337, 2002, 226-230.
- [16] Tsunekawa S., Ito S., Mori T., Ishikawa K., Li Z.-Q., Kawazoe Y., *Critical size and anomalous lattice expansion in nanocrystalline  $\text{BaTiO}_3$  particles*, Physical Review B – Condensed Matter and Materials Physics, 62, 2000, 3065-3070.
- [17] Völtzke D., Abicht H.-P., *Investigations related to the incorporation of  $\text{Ca}^{2+}$  ions into the  $\text{BaTiO}_3$  lattice*, Journal of Materials Science, 30, 1995, 4896-4900.
- [18] Lin T.-F., Lin J.-L., Hu C.-T., Lin I.-N., *The microstructure developments and electrical properties of calcium-modified barium titanate ceramocs*, Journal of Materials Science 26, 1991, 491-496.
- [19] Wieczorek-Ciurowa K., Gamrat K., Sawłowicz Z., *Characteristics of  $\text{CuAl}_2\text{-Cu}_3\text{Al}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$  nanocomposites synthesized by mechanical treatment*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 80, 2005, 619-623.



SYLWIA DWORAKOWSKA, DARIUSZ BOGDAŁ\*, TOMASZ M. MAJKA,  
KRZYSZTOF PIELICHOWSKI\*\*

## OKREŚLENIE WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH SUROWCÓW POCHODZĄCYCH Z OLEJU RZEPAKOWEGO

### DETERMINATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF RAW MATERIALS OF RAPESEED OIL ORIGIN

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury i szybkości ścinania na lepkość dynamiczną surowców olejowych na przykładzie wybranych pochodnych oleju rzepakowego. Badania przeprowadzono z użyciem reometru HAAKE MARS III firmy Thermo Scientific.

*Słowa kluczowe: reologia, lepkość, oleje roślinne*

#### Abstract

The paper presents results of the research concerning the influence of temperature and shear rate on dynamic viscosity of oil feedstocks on example of selected derivatives of rapeseed oil. The investigations were conducted using HAAKE MARS III rheometer from Thermo Scientific company.

*Keywords: rheology, viscosity, vegetable oils*

\* Mgr inż. Sylwia Dworakowska, prof. dr hab. inż. Dariusz Bogdał, Katedra Biotechnologii i Materiałów Odnawialnych, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

\*\* Mgr inż. Tomasz M. Majka, prof. dr hab. inż. Krzysztof Pielichowski, Katedra Chemii i Technologii Polimerów, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Oleje roślinne są obecnie przedmiotem licznych badań dotyczących możliwości ich zastosowania w syntezie i modyfikacji polimerów. Stanowią one alternatywę dla kosztownych surowców pochodzenia petrochemicznego, a ich pochodne w znaczący sposób poprawiają właściwości fizykochemiczne m.in. żywic epoksydowych oraz pianek poliuretanowych [1, 2]. Szczególną rolę odgrywają oleje naturalne występujące w ogromnych ilościach, takie jak olej sojowy, rzepakowy, palmowy i słonecznikowy.

Jednym z istotnych parametrów reologicznych charakteryzujących oleje roślinne jest lepkość będąca miarą wewnętrznego oporu płynu przeciw płynięciu. Stanowi ona współczynnik proporcjonalności między naprężeniem ścinającym, a odpowiadającym mu gradientem prędkości. Prawo Newtona wyraża liniową zależność między naprężeniem ścinającym a szybkością ścinania. Obowiązuje ono dla wszystkich gazów oraz cieczy i roztworów o małej masie cząsteczkowej.

Zgodnie z prawem lepkości Newtona naprężenie ścinające  $\tau$  jest równe iloczynowi lepkości  $\eta$  i szybkości ścinania  $\dot{\gamma}$  (1).

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Naprężenie ścinające definiuje siła  $F$  przyłożona stycznie do powierzchni  $A$ , która wywołuje przepływ w warstwie cieczy (2).

$$\tau = F/A = \text{N/m}^2 = \text{Pa} \quad (2)$$

Natomiast prędkość przepływu zależy od wewnętrznego oporu cieczy, tzn. od jej lepkości. Największa wartość prędkości przepływu występuje tuż przy poruszającej się powierzchni płyty, z kolei w następnych warstwach cieczy występuje spadek prędkości wzdłuż szerokości szczeliny między płytą ruchomą i nieruchomą  $y$ , określaną jako szybkość ścinania (3).

$$\dot{\gamma} = dv/dy = s^{-1} \quad (3)$$

Krzywa płynięcia w przypadku płynu newtonowskiego jest linią prostą, przechodzącą przez początek układu współrzędnych. Natomiast w przypadku płynów nienewtonowskich krzywa płynięcia nie jest linią prostą bądź też nie przechodzi przez początek układu współrzędnych. Do płynów tego typu należą np. stopione polimery, lakiery i emulsje. Oleje roślinne występują w postaci płynnej oraz wykazują wiele cech cieczy nienewtonowskich. Lepkość tych płynów zależy od parametrów, takich jak temperatura, ciśnienie, szybkość ścinania i naprężenie ścinające [3–7].

W literaturze naukowej jest wiele prac poświęconych reologii modyfikowanych olejów roślinnych, nie znaleziono natomiast dokładnego opisu wpływu temperatury i szybkości ścinania na lepkość dynamiczną pochodnych olejów roślinnych [8–12]. Celem przeprowadzonych badań była analiza reologiczna oleju rzepakowego oraz jego selektywnie uwodornionych, epoksydowych i hydroksylowych pochodnych, które następnie zostaną użyte w syntezie materiałów poliuretanowych.

## 2. Część doświadczalna

Zbadano właściwości reologiczne surowców rzepakowych, takich jak: olej rzepakowy (Rz), selektywnie uwodorniony olej rzepakowy (URz), epoksydowany olej rzepakowy (ERz), epoksydowany selektywnie uwodorniony olej rzepakowy (EURz), polioli z oleju rzepakowego (PRz), polioli z selektywnie uwodornionego oleju rzepakowego (PURz), estry metylowe oleju rzepakowego (FAME), selektywnie uwodornione estry metylowe oleju rzepakowego (UFAME), epoksydowane selektywnie uwodornione estry metylowe oleju rzepakowego (EUFAME), polioli z selektywnie uwodornionych estrów metylowych oleju rzepakowego (PUFAME). W tabeli 1 przedstawiono podstawowe właściwości badanych związków chemicznych.

Tabela 1

### Właściwości badanych pochodnych oleju rzepakowego

| Surowiec | Liczba jodowa [g I <sub>2</sub> /100 g] | Surowiec | Liczba epoksydowa [mol/100 g] | Surowiec | Liczba hydroksylowa [mg KOH/g] |
|----------|---|----------|-------------------------------|----------|--------------------------------|
| Rz       | 112,7                                   | ERz      | 0,141                         | PRz      | 159,4                          |
| URz      | 80,3                                    | EURz     | 0,157                         | PURz     | 158,1                          |
| FAME     | 110,7                                   | EUFAME   | 0,145                         | PUFAME   | 130,4                          |
| UFAME    | 82,1                                    |          |                               |          |                                |

Badania zostały wykonane za pomocą zaawansowanego reometru HAAKE MARS III, który jest jednym z najbardziej zaawansowanych technologicznie reometrów firmy HAAKE. Umożliwia on wykonywanie wszystkich możliwych pomiarów w trybach rotacyjnych i oscylacyjnych. Budowa modułowa pozwala na łatwe dostosowanie urządzenia do aktualnych potrzeb, poza tym do reometru zaprojektowano wiele przystawek umożliwiających rozmaite badania dodatkowe. Wśród nich możliwe są badania wpływu pola elektrycznego, ciśnienia oraz promieniowania UV na własności reologiczne. Dodatkowo, reometr może wykonywać pomiary przy wyjątkowo niskich naprężeniach ścinających oraz wysokich szybkościach ścinania, a także posiada wbudowany moduł pomiaru siły normalnej w obu kierunkach. Modułarna budowa reometru oraz duża liczba geometrii pomiarowych pozwala na skonfigurowanie go dla różnych zastosowań aplikacyjnych. Szeroki wybór płaszczy termostatujących pozwala na pracę w szerokim zakresie temperatur. Ten typ reometru posiada grzany nie tylko dolny, lecz również i górny panel wraz z rotorem, co nie jest spotykane we wszystkich rodzajach dostępnych na rynku reometrów.

Badania wykonano w układzie płytka–płytką. Średnica płytki wynosiła 20 mm. Podczas wykonywania badań wysokość szczeliny pomiędzy płytkami wynosiła 0,4 mm. Na podstawie uprzedniej analizy literaturowej przewidywano, iż badane płyny będą wykazywały właściwości płynów nienewtonowskich, dlatego wszystkie badania zostały przeprowadzone w systemie kontrolowanej prędkości (*Control Rate* – CR), który służy do rejestracji krzywych płynięcia poprzez ocenę odkształcenia materiału pod wpływem naprężenia ścinającego kontrolowanego prędkością obrotową rotora. Pomiary w systemie CR – *Rotation Ramp* zostały wykonane w zakresie od 0 do 4000 1/s, natomiast CR – *Rotation Temperature Ramp* w zakresie od 30 do 60°C. W obydwu przypadkach zmiany wartości parametrów następowały w sposób ciągły.

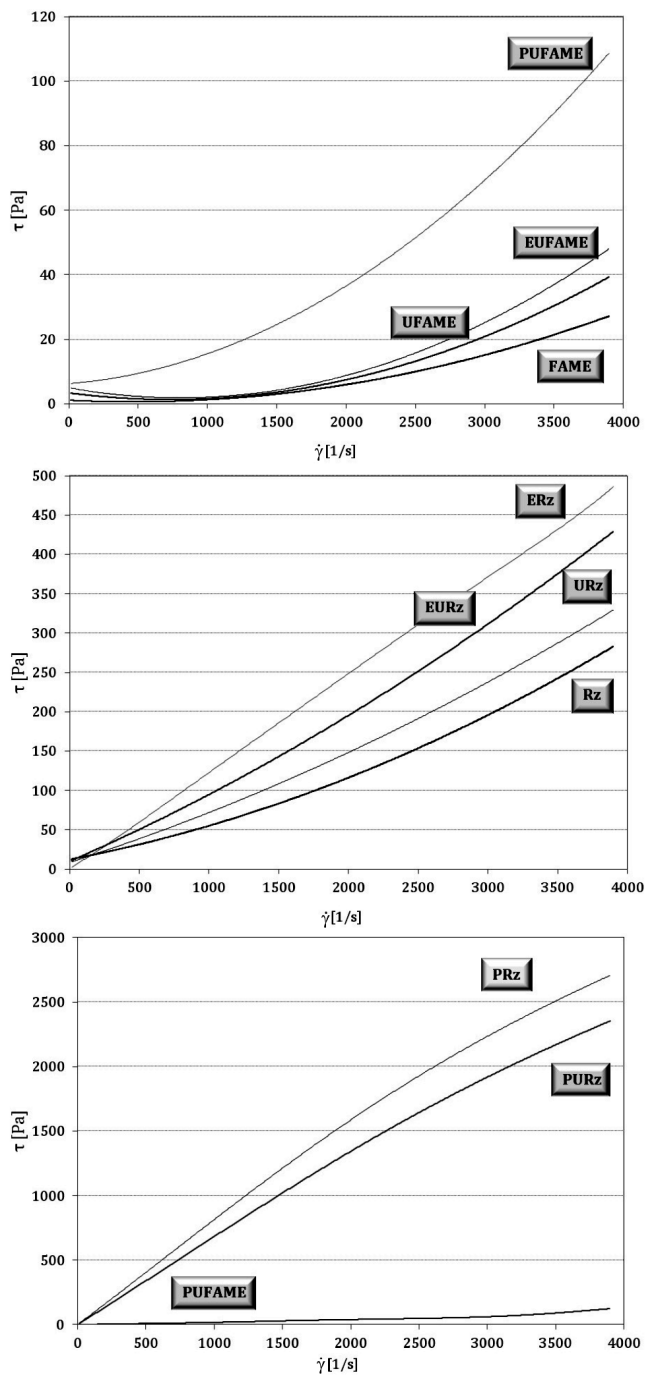
### 3. Dyskusja wyników

#### CR – *Rotation Ramp*

Na rysunku 1 przedstawiono krzywe płynięcia dla 10 badanych płynów, które pozwalają stwierdzić, czy spełniają one prawo Newtona w całym zakresie przemiatania szybkością ścinania. Okazuje się, że wszystkie badane ciecze wykazują właściwości płynów nienewtonowskich. Porównując krzywe płynięcia przedstawione dla pochodnych estrów metylo- wych oleju rzepakowego (FAME) zaobserwowano, iż UFAME, EUFAME oraz PUFAME wykazują właściwości płynów zagęszczanych ścinaniem posiadających granicę płynięcia. Oznacza to, że płyną one po przekroczeniu pewnego granicznego naprężenia. Wywnioskowano, iż w przeciwieństwie do nich próbka FAME będąca próbką referencyjną zachowywała się jak dilatantny płyn nienewtonowski nieposiadający granicy płynięcia. Krzywe wskazują, iż zagęszczanie rosło wraz ze zwiększeniem szybkości ścinania. Ponadto krzywe płynięcia pozwalają pogrupować próbki ze względu na wartość granicy płynięcia. Najmniejszą granicą płynięcia cechowała się próbka referencyjna, następnie UFAME oraz EUFAME. Największą wartość zanotowano dla próbki PUFAME. Z kolei krzywe płynięcia przedstawione dla płynów otrzymanych z oleju rzepakowego pokazują, iż ERz, URz oraz EURz wykazują właściwości płynów nienewtonowskich również posiadających pewną granicę płynięcia, zagęszczanych ścinaniem. Ich wartości maksymalne naprężenia ścinającego dla poszczególnych płynów są wyższe niż wartości naprężeń odpowiadających im płynów zawierających FAME. Ponadto zaobserwowano, iż próbka ERz wykazuje właściwości zbliżone do płynu newtonowskiego w całym zakresie badania. Próbka ERz uzyskała wartość maksymalną naprężenia ścinającego wyższą niż dla PUFAME. Analiza pozwala wysnuć mylne wnioski w stosunku do właściwości tej próbki, dlatego dopiero zbadanie zależności lepkości pozornej w funkcji szybkości ścinania potwierdza zachowanie właściwości płynu nienewtonowskiego. Na podstawie porównania otrzymanych polioli można stwierdzić znaczące różnice wartości naprężenia ścinającego polioli PUFAME i PURz.

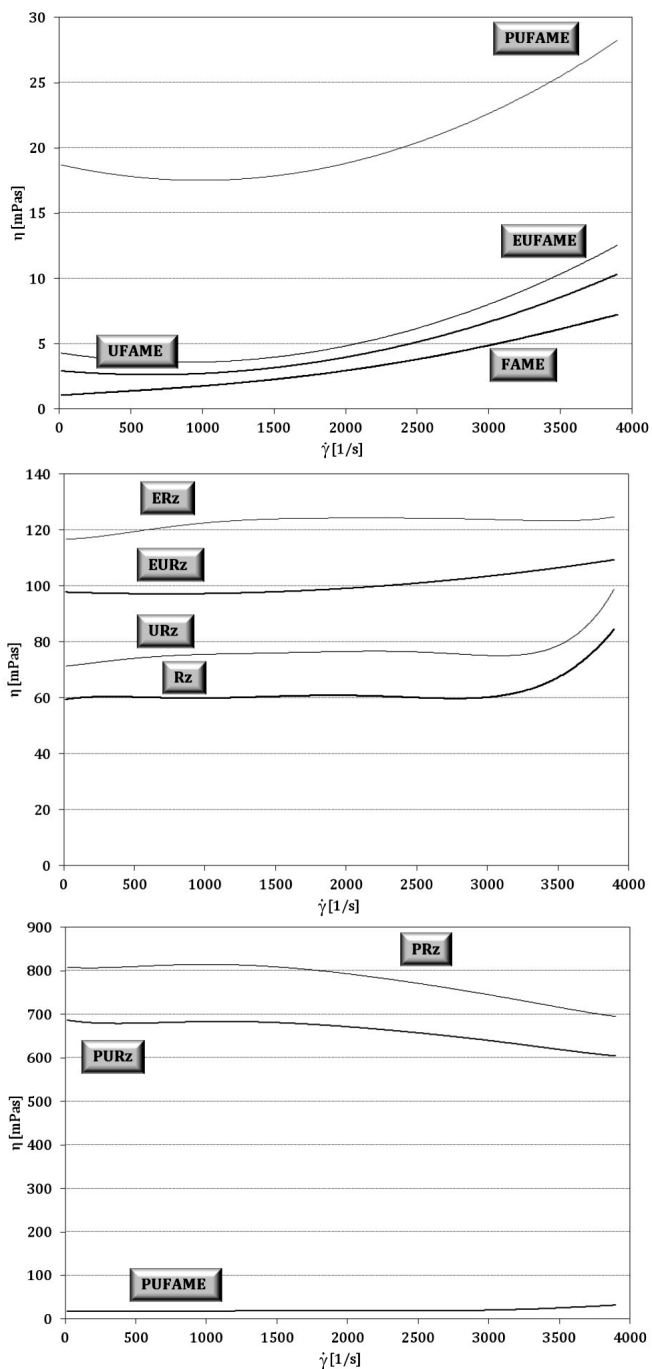
Poliole otrzymane z oleju rzepakowego mają tendencję do zachowywania się jak pseudoplastyczne płyny rozrzedzane ścinaniem, natomiast polioli otrzymany z selektywnie uwodornionych FAME, jak już wspomniano ma właściwości związane z zagęszczeniem ścinania. Przedstawione poniżej wykresy (rys. 2)  $\eta = f(\dot{\gamma})$ , potwierdzają w całym zakresie wnioski z krzywych płynięcia. Dla próbki ERz krzywa nie jest linią prostą, co dowodzi tym samym o zachowaniu właściwości płynu nienewtonowskiego tej próbki. Natomiast próbki otrzymane z oleju rzepakowego (bez polioli) mają odmienny charakter. Przy niskich wartościach szybkości ścinania wykazują charakter nieco pseudoplastyczny, by przy wyższych wartościach szybkości gwałtownie ulec zagęszczeniu. Dzieje się tak, ponieważ w zakresie niskich prędkości ścinania występuje stały stosunek naprężenia ścinającego do szybkości ścinania, a olej zachowuje się bardziej jak płyn newtonowski o stałej lepkości. W zakresie większych prędkości stosunek naprężenia ścinającego do szybkości ścinania nie pozostaje stały i prze- waza charakter dilatantny.





Rys. 1. Krzywe płynięcia dla pochodnych oleju rzepakowego

Fig. 1. Flow curves for derivatives of rapeseed oil



Rys. 2. Zależność lepkości od szybkości ścinania dla pochodnych oleju rzepakowego

Fig. 2. Relation between viscosity and shear rate for derivatives of rapeseed oil

### CR – Rotation Temperature Ramp

Krzywe  $\eta = f(\dot{\gamma})$ , pozwalają znaleźć zakres ścinania, w którym lepkość pozostaje pozornie stała (z niewielkimi odchyleniami), tzw.  $\eta_0$ . Dla wszystkich badanych próbek wybór identycznego zakresu lepkości zerowej okazał się być nieco skomplikowany, gdyż krzywe wykazywały cechy znacząco odbiegające od idealnych krzywych płynów nienewtonowskich. Analizując krzywe, wybrano punkt  $\dot{\gamma} = 1000$  1/s, w którym lepkość pozorna dla większości płynów wydawała się być stała. Dla tej wartości szybkości ścinania badano wpływ temperatury na lepkość pozorną, ponieważ w tym obszarze wpływ temperatury na lepkość pozorną jest znacznie większy przy mniejszych szybkościach ścinania niż przy większych. Krzywe  $\eta = f(T)$  zostały przedstawione na rys. 3.

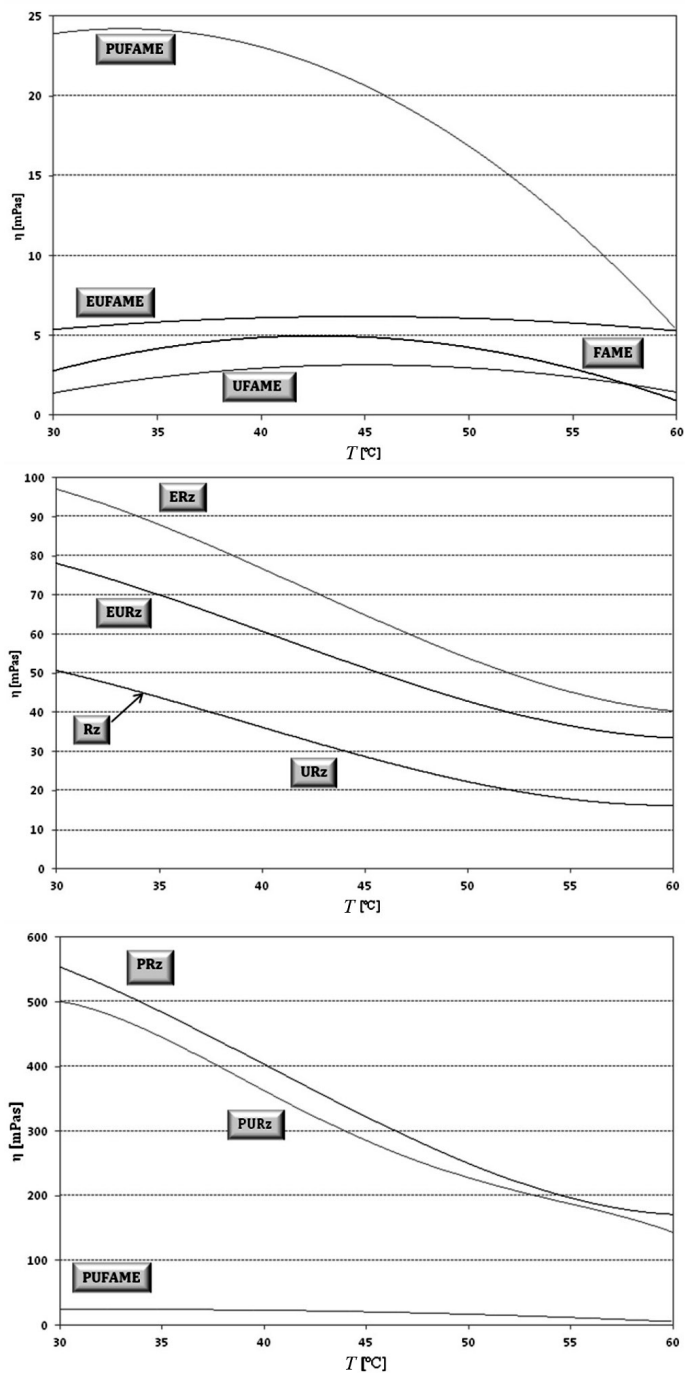
Lepkość płynów otrzymanych z oleju rzepakowego, jak i lepkość badanych polioli maleje wraz ze wzrostem temperatury. Można to tłumaczyć zwiększaniem się ruchliwości cząsteczek oraz objętości swobodnej pomiędzy nimi. Wywnioskowano, iż płyny otrzymane z oleju rzepakowego wykazują właściwość zwiększenia lepkości, gdy struktura dąży do uporządkowania, z kolei gdy obniżamy temperaturę, osiągając punkt krzepnięcia, lepkość staje się mało wrażliwa na zmiany temperatury. Natomiast z drugiej strony zwiększenie temperatury w kierunku punktu wrzenia zaburza układ rozrzedzając go, tym samym lepkość pozorna wykazuje silną zależność od temperatury. Dla płynów, w których użyte były FAME, maksymalne rozrzedzenie obserwujemy w temperaturze około 45°C, po czym następuje powrót do początkowej lepkości. Zmiany lepkości pochodnych FAME pod wpływem temperatury wydają się być niewielkie bądź znikome. Ciekawym i istotnym pytaniem jest, jak zmienia się lepkość tych próbek w niebadanych temperaturach i czy to jest jedyne maksimum osiągnięte przez te próbki.

Podobne spostrzeżenia zaobserwowano w przypadku polioli. PURz otrzymany z selektywnie uwodornionego oleju rzepakowego ma tendencję podobną do płynów otrzymanych z oleju rzepakowego, tylko o wyższych wartościach. Natomiast PUFAME nie zachowuje tendencji płynów otrzymanych z FAME i jego trend odmiennie ostro zanika w końcowych wyższych temperaturach. Oznacza to, że w wysokich temperaturach istnieje duży wpływ na lepkość pozorną.

Korzystając z reguły empirycznej (4) oraz znając stałą materiałową zależną od temperatury dla danego płynu (b), można – używając otrzymanych danych – wyznaczyć lepkość pozorną płynu w danej temperaturze znając lepkość tego płynu w innej temperaturze.

$$\eta(T) = \eta_T \exp[-b(T - T_T)] \quad (4)$$

Zatem wyznaczenie lepkości pozornej w tym wąskim zakresie 30°C dla poszczególnych płynów, w zupełności wystarczy, aby wyznaczyć lepkość pozorną w interesujących nas, niebadanych temperaturach.



Rys. 3. Zależność lepkości od temperatury dla pochodnych oleju rzepakowego  
 Fig. 3. Relation between viscosity and temperature for derivatives of rapeseed oil

#### 4. Wnioski

Spośród przebadanych surowców pochodzenia roślinnego wszystkie oleje wykazują charakter cieczy nienewtonowskich. Porównano wyniki badań przeprowadzonych w trybie CR – Rotation Ramp. Krzywe płynięcia przedstawione dla pochodnych estrów metylowych oleju rzepakowego (FAME) pokazały, iż selektywnie uwodornione FAME, epoksydowane selektywnie uwodornione FAME oraz poliol otrzymany z selektywnie uwodornionych FAME wykazują właściwości płynów zagęszczanych ścinaniem posiadających granicę płynięcia. Wywnioskowano, iż w przeciwieństwie do nich próbka FAME będąca próbką referencyjną zachowywała się jak dilatantny płyn nienewtonowski nieposiadający granicy płynięcia. Krzywe wskazują, iż zagęszczanie rosło wraz ze zwiększeniem szybkości ścinania. Ponadto krzywe płynięcia pozwalają pogrupować próbki ze względu na wartość granicy płynięcia. Poliole otrzymane z oleju rzepakowego mają tendencję do zachowywania się jak pseudoplastyczne płyny rozrzedzane ścinaniem, natomiast poliol otrzymany z selektywnie uwodornionych FAME posiada właściwości związane z zagęszczaniem ścinania. Badania przeprowadzone w trybie CR – *Rotation Temperature Ramp* pozwoliły wysnuć wnioski, iż płyny otrzymane z oleju rzepakowego wykazują właściwość zwiększania lepkości, gdy ich struktura dąży do uporządkowania, tzn. gdy obniżamy temperaturę, osiągając punkt krzepnięcia, lepkość staje się mało wrażliwa na zmiany temperatury. Natomiast z drugiej strony zwiększenie temperatury w kierunku punktu wrzenia zaburza układ rozrzedzając go, tym samym lepkość pozorna wykazuje silną zależność od temperatury.

#### Literatura

- [1] Campanella A., Rustoy E., Baldessari A., Baltanas M.A., *Lubricants from chemically modified vegetable oils*, Bioresource Technology, 101, 2010, 245-254.
- [2] Guner F.S., Yagci Y., Erçiyes A.T., *Polymers from triglyceride oils*, Progress in Polymer Science, 31, 2006, 633-670.
- [3] Wcisło G., *Określenie właściwości reologicznych oleju napędowego oraz biopaliw uzyskanych z Inianki*, Inżynieria Rolnicza, 5, 2009, 295-301.
- [4] Wcisło G., *Wyznaczenie wpływu temperatury na lepkość dynamiczną biopaliw roślinnych*, Inżynieria Rolnicza, 10(108), 2008, 277-282.
- [5] Golimowski W., Nowak A., *Badania lepkości kinematycznej biopaliw pochodzenia zwierzęcego*, Problemy Inżynierii Rolniczej, 4, 2008, 173-180.
- [6] Giap S.G.E., Nik W.M.N.W., Ahmad M.F., Amran A., *The assessment of rheological model reliability in lubricating behaviour of vegetable oils*, Engineering e-Transaction, 4, 2009, 81-89.
- [7] Czub P., *Zastosowanie epoksydowanego oleju sojowego do regulowania lepkości kompozycji epoksydowych*, Polimery, 51, 2006, 11-12.
- [8] Qinghua L., Dehua T., Jianhua Z., Yunhui M., *Rheological and Tribological Characteristics of Chemically Modified Rapeseed Oil*, Advanced Tribology, 2010, 912-914.
- [9] Li Q.H., Tao D.H., Wang B., Mo Y.H., *The rheology characteristics and oxidation stability of chemically modified soybean oil*, Lubrication Engineering, 201, 2008, 66-67.

- [10] Yalcin H., Toker O.S., Dogan M., *Effect of oil type and fatty acid composition on dynamic and steady shear rheology of vegetable oils*, Journal of Oleo Science, 61, 2012, 181-187.
- [11] Fasina O.O., Colley Z., *Viscosity and specific heat of vegetable oils as a function of temperature: 35°C to 180°C*, International Journal of Food Properties, 11, 2008, 738-746.
- [12] Nouredдини H., Teoh B.C, Clements D.L., *Viscosities of Vegetable Oils and Fatty Acids*, Journal of the American Oil Chemists' Society, 69, 1999, 1189-1191.

SZYMON GADEK, MAREK HEBDA, JAN KAZIOR\*

## ZASTOSOWANIE DYLATOMETRII W BADANIACH PRZEMYSŁOWYCH NA PRZYKŁADZIE PROSZKU FERRYTYCZNEJ STALI NIERDZEWNEJ AISI 434L

---

### ADVANTAGE OF DILATOMETRIC RESEARCH IN INDUSTRY PRESENTED FOR FERRITIC STAINLESS STEEL AISI 434L POWDER

#### Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono zarys i rozwój stali nierdzewnych oraz jej podział. Omówiono metody i urządzenia do przeprowadzenia badań dylatometrycznych. Zaprezentowano również wyniki badań, które mogą znaleźć szerokie zastosowanie przemysłowe. Koncentrują się one na analizie procesu spiekania ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej zaprawą mikroproszku zawierającego bor.

*Słowa kluczowe: analiza termiczna, ferrytyczna stal nierdzewna, dylatomia, spiekanie aktywowane*

#### Abstract

This article presents the scope and development of stainless steel. Moreover, paper also presents the results of researches that can find wide industrial applications. They focus on the analysis of the sintering process of ferritic stainless steel AISI 434L modified with addition of boron containing master alloy.

*Keywords: thermal analysis, ferritic stainless steel, dilatometric, activating sintering*

---

\* Mgr inż. Szymon Gądek, dr inż. Marek Hebda, prof. dr hab. inż. Jan Kazior, Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## 1. Stale nierdzewne

### 1.1. Zakres i rozwój stali nierdzewnych

Stal nierdzewna stosowana jest w powszechnym użyciu stosunkowo od niedawna. Pionierami w dziedzinie wytwarzania stopów metali byli Micheael Faraday oraz James Stoddart, którzy w 1820 r. przedstawili jedne z pierwszych badań na ten temat. W swojej pracy opublikowali informację, że stop stali z 10% dodatkiem niklu jest najbardziej odporny na matowiecie na powietrzu. Stwierdzili również, że najlepszą odpornością na korozję charakteryzuje się stop stali z platyną i rodem zawierający 50% pierwiastków stopowych. Uniemożliwiało to jednak masową ich produkcję ze względu na znaczne koszty. Badany przez nich stop stali z najwyższą zawartością chromu (3%) charakteryzował się podwyższoną skrawalnością, ale nie wykazywał zwiększonej odporności korozyjnej [1, 2].

Rok później Francuz Pierre Berthier odkrył, że stop żelaza z chromem jest bardziej odporny na korozję niż samo żelazo. Ponadto dowiódł, że odporność ta wzrasta wraz ze wzrostem ilości chromu w stopie. Niedługo potem rozpoczął produkcję żelazo-chromu, który dodawany był później do stali w celu polepszenia jej własności antykorozyjnych. Niestety nie zdawano sobie jeszcze wtedy sprawy z niekorzystnego wpływu węgla. W 1895 r. niemiecki chemik Hans Goldschmidt odkrył metodę produkcji żelazo-chromu, która pozwoliła na obniżenie zawartości węgla w stalach chromowych. Chociaż jego ilość nie była jeszcze na wystarczająco niskim poziomie, dało to możliwość rozwoju masowej produkcji stali nierdzewnej. W 1904 r. francuski profesor metalurgii Léon Guillet opublikował serię prac, w której przedstawił proces produkcji niskowęglowej stali nierdzewnej z ilością węgla odpowiadającą współczesnym produktom. Opracowane przez niego stopy miały struktury ferrytyczne oraz martenzytyczne. Dwa lata później przedstawił również badania nad stopami żelazo-chrom-nikiel, dając tym samym podwaliny do produkcji stali austenitycznych. Jego badania zostały wykorzystane przez Eduarda Maurera i Benno Straussa, którzy opracowali w laboratoriach badawczych Kruppa komercyjne metody produkcji austenitycznej stali nierdzewnej [2].

W 1913 roku Anglik, Harry Brearly, wykorzystał po raz pierwszy nierdzewną stal martenzytyczną do produkcji ostrzy noży. W 1924 r. American Society for Testing Materials (ASTM) zorganizowało w Atlantic City pierwsze sympozjum poświęcone korozji, żaroodporności oraz oporności elektrycznej stopów. Spotkanie to cieszyło się bardzo dużym powodzeniem, gdyż wówczas to stale odporne na korozję na stałe wkroczyły do przemysłu. Silniki parowe były w tych czasach bardzo powszechne, jednak używane stale nie wykazywały wystarczającej odporności. Powodowało to częste awarie, a w niektórych przypadkach nawet wybuchy kotłów parowych, co generowało dodatkowe koszty. Dlatego też rozwojem stali nierdzewnych zainteresowanie były szerokie rzesze przemysłowców [2].

W dzisiejszych czasach stal nierdzewna jest wszechobecna. Można ją spotkać w każdym domu, ponieważ wykorzystywana jest m.in. do produkcji artykułów gospodarstwa domowego, armatury kuchennej oraz łazienkowej. Wyroby domowego użytku w styczniu 2012 roku stanowiły 38% światowej produkcji stali nierdzewnej. Od lat 70. XX wieku znalazła ona również szerokie zastosowanie w branży budowlanej (obecnie około 17% światowej produkcji jest tam wykorzystywana). Szacuje się, że dla dobrze dobranych warunków konstrukcje wykonane ze stali nierdzewnej mogą mieć trwałość sięgającą nawet kilkuset lat. Trzecim największym odbiorcą stali nierdzewnej (którego zapotrzebowanie na tę stal w 2012 r. wynosiło około 12%) jest przemysł motoryzacyjny. Znalazła ona zastosowanie m.in. do wytwarzania



takich elementów, jak układ wydechowy, ozdobne listwy wykończeniowe, a także elementy karoserii dla pojazdów transportu publicznego [3, 4].

## 1.2. Podział stali odpornych na korozję

Obecnie stalą nierdzewną nazywamy stop żelaza z węglem zawierający  $\geq 10,5\%$  chromu i  $\leq 1,2\%$  węgla oraz inne składniki stopowe [3]. Duża zawartość chromu (przy ograniczonym udziale węgla) przyczynia się do powstania pasywnej warstwy wierzchniej, jaką tworzą tlenki chromu, która ma skłonności do samoczynnej odbudowy. Mechanizm ten zapewnia odporność na korozję wżerową wytworzonej stali.

Główny podział stali nierdzewnych odnosi się do struktury, jaki ma dany stop. Wyróżnić możemy stale:

- ferrytyczne,
- austenityczne,
- martenzytyczne,
- ferrytyczno-martenzytyczne (tzw. stale typu Duplex).

Stale ferrytyczne ze względu na swoją budowę krystalograficzną mają właściwości magnetyczne. Głównym składnikiem stopowym w tym przypadku jest Cr, którego udział objętościowy mieści się w zakresie od 10 do 30%. Cechują się one lepszą odpornością na korozję niż stale martenzytyczne [4].

Stale ferrytyczne możemy dodatkowo podzielić na pięć grup, których głównym kryterium jest zawartość chromu. Zwiększenie ilości chromu w stali powoduje wzrost właściwości antykorozyjnych. Dodatkowo grupy III i IV zawierają molibden oraz inne dodatki stopowe. Podział głównych grup ferrytycznych stali nierdzewnych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

**Główne grupy ferrytycznych stali nierdzewnych wg [3]**

| Grupa   | I                            | II    | III                   | IV                  | V           |
|---|------------------------------|-------|-----------------------|---------------------|-------------|
| Zawartość chromu [% cięż.]  | 10–15                        | 14–18 | 14–18                 | 18–30               | 18–30       |
| Ilość dodatków  | –                            | –     | Ti, Nb                | Mo (do 0,5%)        | –           |
| Przykładowy typ stali wg normy American Iron and Steel Institute (AISI) | 409,<br>410,<br>410L,<br>420 | 430   | 430Ti,<br>439,<br>441 | 434,<br>436,<br>444 | 446,<br>445 |

Stale austenityczne w odróżnieniu do ferrytycznych nie mają właściwości magnetycznych. Głównym składnikiem stopowym oprócz chromu (najczęściej o zawartości 18%) jest również nikiel (o zawartości  $\geq 8\%$ ). Dzięki temu stop ten może osiągnąć strukturę austenityczną w temperaturze otoczenia. Powoduje to zwiększenie odporności elektrochemicznej. Zawartość węgla jest na poziomie 0,08%. W niektórych gatunkach stali, dla podwyższenia odporności na korozję, oprócz głównych pierwiastków stopowych dodaje się również molibden (2–4%). Do utwardzenia tego typu stopu stosuje się obróbkę plastyczną. Stal ta cechuje się dobrą odpornością na korozję (szczególnie w środowisku agresywnym), plastycznością oraz spawalnością.

Stale martenzytyczne zawartość chromu w tego typu stalach waha się między 12 a 18%. Możliwa jest ich obróbka cieplna, taka sama jak w przypadku zwykłych stali węglowych. Jej odporność korozyjna jest ograniczona, ponadto cechuje się złą spawalnością i stosunkowo małą podatnością na obróbkę plastyczną.

Stal Duplex – można scharakteryzować jako połączenie stali austenitycznej i ferrytycznej. Jako pierwiastki stopowe w tym przypadku stosuje się chrom (w zakresie od 18 do 28%), nikiel (od 4 do 7%), molibden (1–7,5%), a także azot, który stabilizuje strukturę austenityczną, co również poprawia odporność na korozję, np. wżerową. Ponadto stale te są dobrze spawalne i odporne na pękanie w warunkach korozji naprężeniowej w środowisku chlorków.

## 2. Właściwości spiekanych nierdzewnych stali ferrytycznych

### 2.1. Metalurgia proszków

Produkcja spiekanych części w ostatnich latach stała się coraz częściej wykorzystywaną techniką do wytwarzania najróżniejszych wyrobów. Największym odbiorcą wytworzonych tą technologią materiałów jest przemysł motoryzacyjny. Inne gałęzie przemysłu, takie jak np. maszynowy, energetyczny i budowlany również korzystają z zalet, jakie oferuje technologia metalurgii proszków. Technikę tę coraz częściej stosuje się ze względu na możliwość praktycznie nieograniczonego sterowania właściwościami wytworzonego wyrobu (np. struktury oraz udziału objętościowego porowatości) m.in. poprzez modyfikację i kontrolę składu chemicznego oraz parametrów wytwarzania. Do ekonomicznych zalet takiego typu produkcji należy również zaliczyć wysoką materiało- i energooszczędność, zwłaszcza w odniesieniu do drobnych elementów o skomplikowanych kształtach produkowanych wielkoseryjnie [5, 6].

### 2.2. Spiekana nierdzewna stal ferrytyczna

Skład chemiczny proszków stali nierdzewnej używanych do produkcji spieków jest zbliżony do składu chemicznego materiałów litych o tym samym oznaczeniu. Symbol „L” umieszczony na końcu nazwy/oznaczenia proszku oznacza obniżoną zawartość węgla, która nie może przekraczać 0,03%. Aby materiał w temperaturze otoczenia miał strukturę ferrytyczną w stopie, należy ograniczyć zawartość takich pierwiastków, jak m.in. węgiel, azot i nikiel, które stabilizują austenit. Szczególną uwagę należy zwrócić na węgiel i azot, gdyż te składniki bardzo trudno jest usunąć ze stopu ze względu na ich silne powinowactwo do chromu. Ponadto rozszerzają one zakres dwufazowy występowania austenitu i ferrytu. Dodatkowo ich niewielkie ilości, bo już dodatek w setnych procentach, działają na zmiany struktury materiału. Informacje te mogą mieć szczególne znaczenie dla materiałów spiekanych, gdyż niejednokrotnie do prasowania proszków dodaje się środki poślizgowe w celach polepszenia ich prasowalności, uzyskania homogenicznego rozkładu gęstości oraz wydłużenia czasu użytkowania urządzeń prasujących. Najczęściej środki te zawierają w sobie dużo węgla. Należy, więc pamiętać o dokładnym ich wypaleniu przed procesem spiekania. Jeżeli proces ten nie będzie przeprowadzony właściwie można zaobserwować w strukturze materiału spiekane austenit, który podczas chłodzenia przemieni się w martenzyt i spowoduje znaczne zmiany wymiarowe. Należy również unikać jako atmosfery ochronnej azotu. Dlatego zazwyczaj stosowany jest czysty wodór, wysoka próżnia lub też argon [7].

### 2.3. Kierunki rozwoju spiekanych stali nierdzewnych

Najnowsze badania koncentrują się nad opracowaniem materiałów i procesów technologicznych, tak aby materiały spiekane miały coraz lepsze właściwości wytrzymałościowe. W tym celu stosowane są m.in. różne techniki prasowania/spiekania oraz różne dodatki stopowe. Mają one zapewnić wzrost gęstości i zmniejszenie udziału objętościowego porowatości, a co za tym idzie znacząco podwyższyć właściwości wytrzymałościowe. Dodatki stopowe powodują aktywowane spiekanie, co generuje proces intensyfikujący transport materii w materiale [8].

Badania wykazały, że na intensyfikację procesu spiekania ma wpływ wiele czynników. Jednym z nich jest liczba atomowa pierwiastka dodanego jako aktywator. Stwierdzono, że pierwiastki o małej liczbie atomowej, takie jak bor, azot, węgiel oraz trudnotopliwe, jak molibden, wolfram czy tantal są dobrymi aktywatorami przy spiekaniu proszków żelaza [8].

Badania spieków z ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej borem, w postaci zaprawy mikroproszku, mogą w znaczący sposób przyczynić się do zwiększenia zastosowania spiekanych stali nierdzewnych w przemyśle. Wstępna analiza tego tematu wykazała, że bor dodawany w postaci zaprawy do proszku stali nierdzewnej powoduje znaczny wzrost gęstości spiekanych materiałów, a tym samym znaczącą poprawę właściwości wytrzymałościowych.

## 3. Analiza termiczna

### 3.1. Badania dylatometryczne

Główną cechą badań dylatometrycznych jest pomiar liniowych wymiarów badanej próbki w funkcji zmian temperatury. Kiedy następuje wzrost temperatury zwiększa się objętość dowolnej substancji. W sposób ilościowy zmianę wymiarów opisuje współczynnik rozszerzalności termicznej dzięki czemu dostarcza informacji, jak poszczególne substancje reaguje na zmianę temperatury. W czasie gdy atomy zaczynają otrzymywać dodatkową porcję energii w postaci ciepła, wzrasta ich ruch oscylacyjny wokół średnich położeń. Dzięki temu rośnie średnia odległość pomiędzy atomami. Wartość tego wzrostu jest na poziomie około 7%, od temperatury zera bezwzględnego, do temperatury topnienia [9].

Wymiary mogą ulec zmianie również poprzez występowanie przemiany fazowej. Jako przykład może posłużyć przemiana fazowa występująca podczas hartowania. Przyjmijmy, że objętość komórki elementarnej ferrytu wynosi 100%. Kiedy pod wpływem ciepła dostarczonego następuje przebudowa sieci krystalograficznej ferryt → austenit, objętość zmniejsza się do ok. 90%. Natomiast, jeśli doprowadzimy do przemiany austenit → martenzyt, objętość rośnie i osiąga poziom ok. 110%. Badania dylatometryczne pozwalają na precyzyjne wyznaczenie m.in. takich zależności (jak np. obliczenie współczynnika rozszerzalności cieplnej, wyznaczenia temperatur zachodzących przemian, porównania procesów spiekania badanych materiałów).

### 3.2. Podział dylatometrów

Dylatometry możemy podzielić na różne rodzaje. Pod względem sposobu pomiaru wyróżniamy dylatometry różnicowe oraz dylatometry bezwzględne. Urządzenia różnicowe, jak wskazuje na to ich nazwa, wykonują równoczesny pomiar zmiany długości w próbce wzor-

cowej (referencyjnej) oraz próbce badanej. Jako przykład może posłużyć dylatometr Chevenarda [9]. Dylatometry bezwzględne natomiast mierzą długość bezpośrednio na próbce badanej. Możemy również dokonać podziału dylatometrów ze względu na sposób rejestracji danych. Wyróżniamy dylatometry: mechaniczne, optyczne i elektryczne. Pozyskiwanie danych w dylatometrach mechanicznych polega na ich zapisie na bębnie przy zastosowaniu przełożenia mechanicznego. Optyczna metoda pozwala mierzyć wymiar próbki bezpośrednio przez mikroskop. Wraz ze zmianą długości próbki następuje odchylenie zwierciadła, które odbija plamkę świetlną i zmienia jej położenie. Wymienione metody są już obecnie rzadko stosowane. Działanie nowoczesnych dylatometrów oparte jest na metodzie elektrycznej. Urządzenie wyposażone jest w rejestrator otrzymujący informację od czujnika w postaci impulsów elektrycznych. Również poprzez położenie badanej próbki można dokonać podziału dylatometrów. W takim wypadku mamy do czynienia z dylatometrami poziomymi lub pionowymi.

Wynikiem pomiarów dylatometrycznych jest wykres (tzw. dylatogram), pokazujący zmianę wymiaru badanej próbki w funkcji temperatury i/lub czasu. Aby zminimalizować wpływ atmosfery zewnętrznej większość dylatometrów ma możliwość prowadzenia badań w atmosferach kontrolowanych.

## 4. Badania własne

### 4.1. Metodyka badań

Do badań zastosowano rozpylany wodą proszek ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L dostarczony przez firmę Höganäs oraz mikroproszek zaprawy za bazie Fe zawierającej dodatek boru.

W tabeli 2 zaprezentowano skład chemiczny oraz główne właściwości technologiczne proszku ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L.

Tabela 2

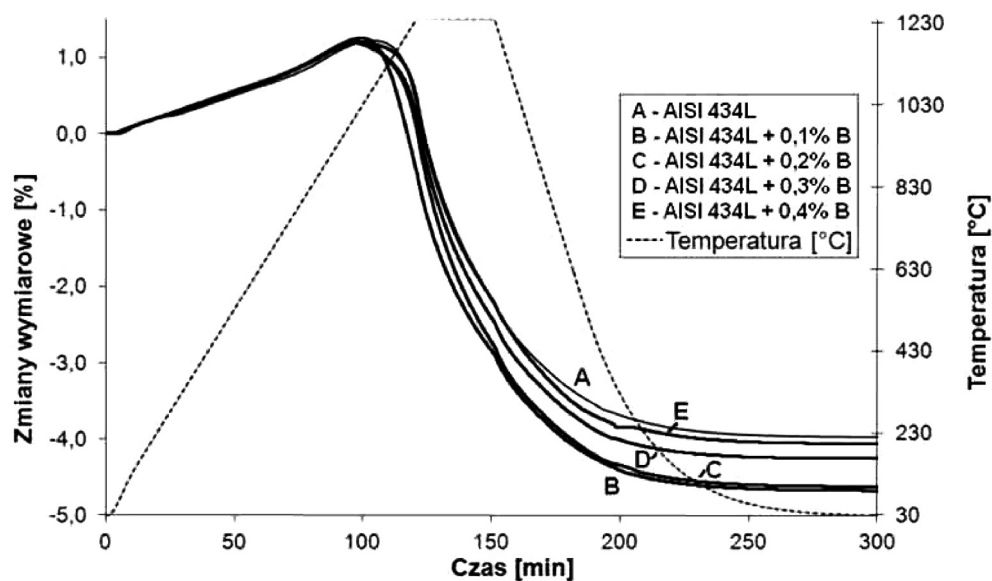
**Skład chemiczny rozpylanego wodą proszku AISI 434L**

| Nazwa proszku | Gęstość nasypowa [g/cm <sup>3</sup> ] | Sypkość [s/50g] | Skład chemiczny [% cież.] |      |      |     |      |      |    |
|---------------|---------------------------------------|-----------------|---------------------------|------|------|-----|------|------|----|
|               |                                       |                 | Fe                        | C    | Cr   | Si  | O    | N    | Mo |
| AISI 434L     | 2,78                                  | 33              | 81,07                     | 0,02 | 16,8 | 0,8 | 0,27 | 0,04 | 1  |

Skład badanych mieszanek proszków został tak dobrany, aby zawierały one odpowiednio 0,1; 0,2; 0,3; i 0,4% cięż. boru. Następnie próbki otrzymane z mieszaniny proszku AISI 434L oraz zaprawy boru mieszano w mieszalniku Turbula przez 24 godziny. Tak przygotowane mieszanki dwustronnie prasowano pod ciśnieniem 600 MPa. Otrzymano prostopadłościenne próbki o wymiarach 4 × 4 × 15 mm. Następnie spieczono je w dylatometrze poziomym DIL 402C firmy Netzsch w temperaturze 1240°C przez 30 minut w atmosferze suchego wodoru (5.0). Szybkość nagrzewania do temperatury izotermicznego spiekania wynosiła 10°C/min, natomiast szybkość chłodzenia do temperatury otoczenia wynosiła 20°C/min.

#### 4.2. Analiza dylatometryczna procesu spiekania stali AISI 434L modyfikowanej dodatkiem zaprawy zawierającej bor

Na rysunku 1 przedstawiono zarejestrowane zmiany wymiarowe spiekanych kształtek wykonanych z proszku ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L (bez wprowadzanych dodatków oraz modyfikowanych zaprawą zawierającą bor odpowiednio w ilości 0,1; 0,2; 0,3; i 0,4% cięż.). Krzywa przerywana prezentuje zadany profil temperaturowy.

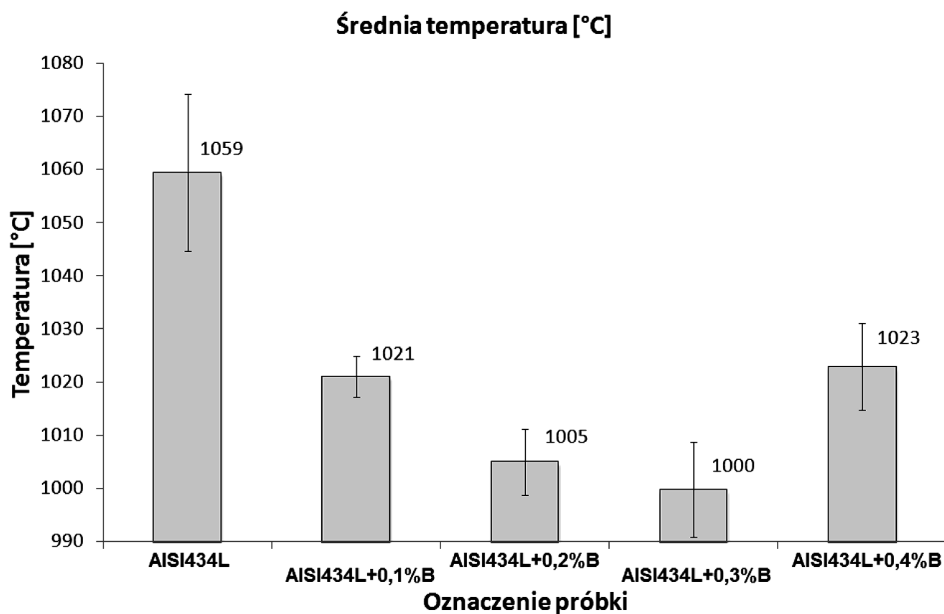


Rys. 1. Zmiany wymiarowe spiekanych kształtek wykonanych z proszku ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej borem

Fig. 1. Dimensional changes of the sintered ferritic stainless steel AISI 434L modified with boron master alloy

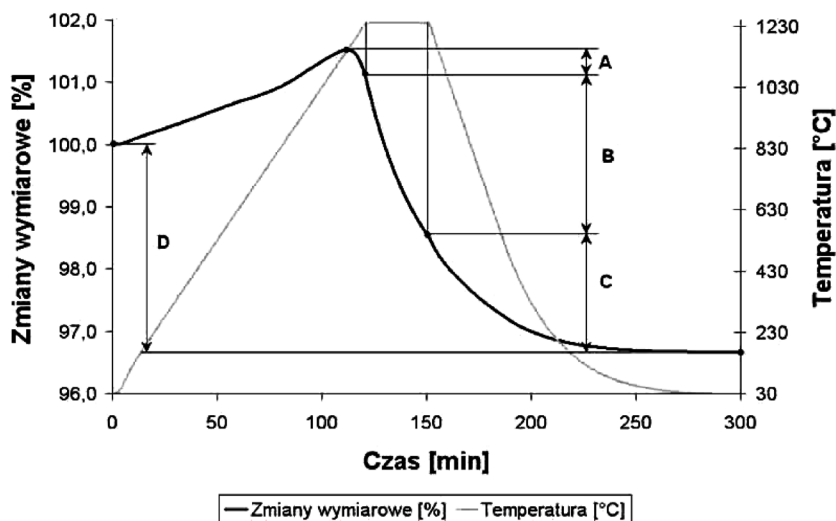
Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że największe zmiany wymiarowe zarejestrowano dla próbki z zawartością 0,1% cięż. boru. Całkowity skurcz próbki wynosi  $4,68 \pm 0,12\%$ . Temperatura, w której rozpoczyna się proces spiekania ulega znacznej zmianie w zależności od badanego składu chemicznego (rys. 2). Dla niemodyfikowanej stali AISI 434L proces ten rozpoczyna się w temperaturze około  $1060^{\circ}\text{C}$ . Wprowadzenie dodatku zaprawy zawierającej bor w ilościach 0,2% lub 0,3% spowodowało najintensywniejsze obniżenie początku temperatury spiekania materiału do wartości około  $1000^{\circ}\text{C}$ . Efekt ten jest rezultatem tworzącej się fazy ciekłej powstającej w wyniku zachodzącej reakcji eutektycznej pomiędzy żelazem a  $\text{Fe}_2\text{B}$ . Powstała faza ciekła jak również duże powinowactwo chemiczne boru do tlenu znajdującego się na powierzchni cząstek spiekanej ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L to dwa najistotniejsze mechanizmy aktywujące w tym układzie proces spiekania.

Na rysunku 3 przedstawiono schemat wykorzystywany do obliczeń skurczów występujących w poszczególnych etapach spiekania (nagrzewania, izotermicznego spiekania oraz chłodzenia). Prezentuje on również sposób odczytywania całkowitego skurczu próbki.



Rys. 2. Temperatury rozpoczęcia procesu spiekania dla próbek ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej borem

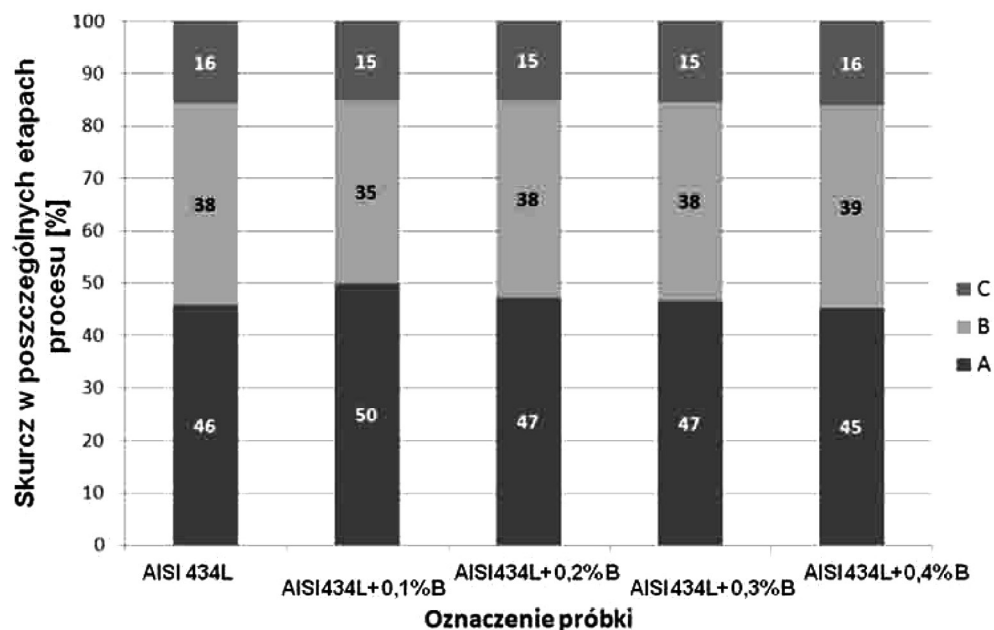
Fig. 2. Start sintering temperature of ferritic stainless steel AISI 434L samples modified with boron



Rys. 3. Schemat obliczania skurczu w poszczególnych etapach. A – skurcz w trakcie nagrzewania, B – skurcz podczas izotermicznego spiekania; C – skurcz podczas etapu schładzania do temperatury otoczenia, D – całkowity skurcz

Fig. 3. Diagram calculation at various stages of contraction. A – contraction during the heating, B – isothermal contraction, C – contraction during cooling to room temperature, D – total contraction

Stosując się do wytycznych zaprezentowanych na rys. 3, obliczono procentowe zmiany skurczu badanych próbek w poszczególnych etapach spiekania. Otrzymane wyniki przedstawione na rys. 4 obliczone zostały w stosunku do zarejestrowanego całkowitego skurczu badanego materiału.

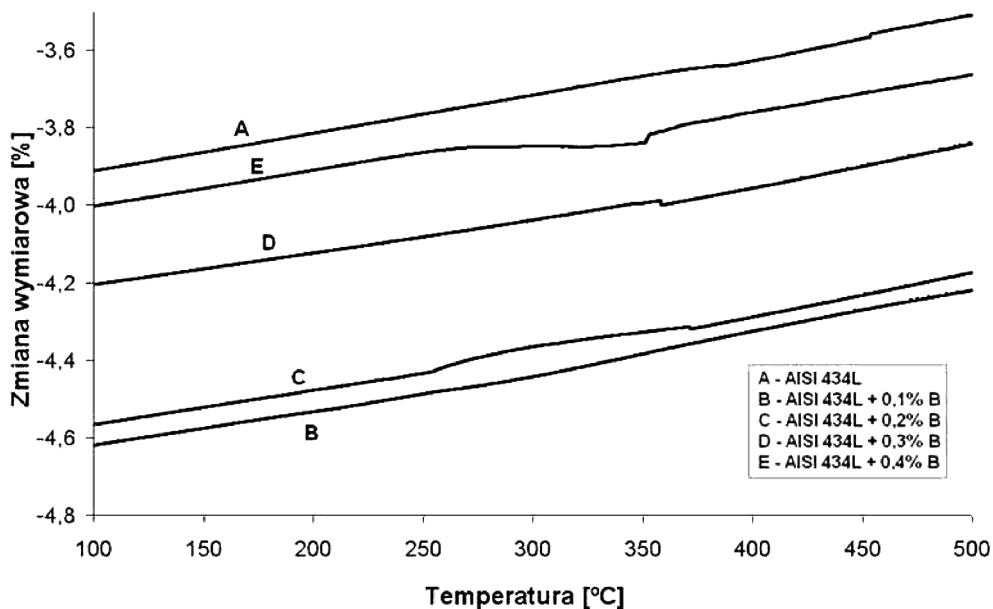


Rys. 4. Procentowy skurcz w poszczególnych etapach procesu spiekaniadla próbek ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej borem

Fig. 4. Percent contraction at various stages of sintering process of ferritic stainless steel AISI 434L samples modified with boron

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że dla wszystkich badanych próbek największy procentowy skurcz odnotowano w trakcie etapu nagrzewania (odcinek A na krzywych dylatometrycznych, rys. 3). Dla próbki modyfikowanej 0,1% cięż. boru skurcz ten wynosi najwięcej bo aż 50% całkowitej zmiany wymiarowej. Zaobserwowano również, że wraz ze wzrostem zawartości zaprawy dodatku boru wprowadzanej do ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L rejestrowany w trakcie nagrzewania materiału skurcz był coraz mniejszy. Analizując etap izotermicznego spiekania (odcinek B na krzywych dylatometrycznych, rys. 3), można jednoznacznie zaobserwować, że kinetyka zmian wymiarowych ulega znacznemu spowolnieniu (w porównaniu z etapem nagrzewania). Dla próbki, która wcześniej wykazywała największy procentowy skurcz (0,1% cięż. boru) w etapie izotermicznego spiekania zarejestrowano jej najmniejsze zmiany wymiarowe (wynoszące 38% całkowitego skurczu). Podczas chłodzenia (odcinek C na krzywych dylatometrycznych, rys. 3) można zauważyć, że we wszystkich wypadkach skurcz jest na podobnym poziomie (i wynosi około 15%). Jego wartość jest wyraźnie mniejsza w całym procesie spiekania materiałów.





Rys. 5. Zmiany wymiarowe podczas chłodzenia spiekanych kształtek z proszku ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej zaprawą zawierającą bor

Fig. 5. Dimensional changes of the sintered ferritic stainless steel AISI 434L modified with boron during cooling

Analizując wykres zmian wymiarowych zarejestrowanych podczas etapu chłodzenia (rys. 1 i 5), można zauważyć, że w próbkach modyfikowanych zaprawą zawierającą bor występuje wyraźne załamanie krzywych dylatometrycznych jednoznacznie świadczące o zachodzącej w materiale przemianie. Stwierdzono, że obserwowany efekt jest tym bardziej wyraźny, im większą zawartość zaprawy zawierającej bor wprowadzono do ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L. Ponieważ przemiana ta powoduje pęcznienie próbki (wzrost wartości rejestrowanych na krzywej dylatometrycznej) oraz występuje ona w stosunkowo niskiej temperaturze (około  $-358\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ma więc ona charakter przemiany martenzytycznej.

## 5. Wnioski

W prezentowanym artykule przedstawiono wyniki badań wpływu wprowadzonego dodatku zaprawy w postaci mikroproszku zawierającego bor na właściwości spiekanej ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L. Dokładnie scharakteryzowano przebieg procesu spiekania oraz zmiany wymiarowych zarejestrowanych w trakcie badań dylatometrycznych (materiału bazowego i zawierającego różny dodatek boru). Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że największy wpływ na kinetykę zmian wymiarowych ma dodatek boru w ilości 0,3% cięż. Powoduje on rozpoczęcie procesu spiekania w najniższej temperaturze ( $998\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Ponadto zaobserwowano, że wartości zmian wymiarowych w poszczególnych etapach procesu spiekania były praktycznie niezależne dla wszystkich badanych próbek. Dodatkowo



stwierdzono, że wraz ze wzrostem zawartości boru wprowadzonego w postaci zaprawy do ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L w trakcie chłodzenia próbek rejestrowano coraz to intensywniejsze efekty związane z przeminą martenzytyczną. Uzyskane wyniki mogą mieć duże znaczenie aplikacyjne, gdyż wprowadzenie niewielkiej ilości dodatku boru (0,2% lub 0,3%) w postaci zaprawy do ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L może w znaczącym stopniu obniżyć koszty wytwarzania spiekanych materiałów przez obniżenie temperatury ich spiekania.

*Badania były realizowane dzięki wsparciu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach realizowanego projektu badawczego nr PB 4791/T02/2010/38.*

### Literatura

- [1] Stodart J., Faraday M., *Experiments on the alloys of steel, made with a view to its improvement*, The Philosophical Magazine And Journal, London 1820, 26-34.
- [2] Cobb H.M., *The History of Stainless steel*, ASM International, 2010.
- [3] <http://www.worldstainless.org>.
- [4] <http://www.outokumpu.com>.
- [5] Sekuła M., Nykiel M., Kazior J., *Właściwości mechaniczne spiekanej ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej Mn, Ni i Si*, Archiwum Odlewnictwa, rocznik 6, nr 21(2/2), 2006.
- [6] Igras Ł., Sułkowski M., *Wpływ temperatury spiekania i składu chemicznego atmosfery na strukturę i właściwości mechaniczne spiekanej stali konstrukcyjnej na bazie proszku Astaloy CrL i CrM*, Metalurgia Proszków, Rudy i Metale, R51 2006, nr 11, 686-694.
- [7] Kazior J., Pieczonka T., Nykiel M., *Wybrane właściwości spiekanych stali ferrytycznych*, Rudy i Metale Nieżelazne R. 45, nr 12, 2000, 623-629.
- [8] Kazior J., *Bor w spiekanych austenitycznych stalach nierdzewnych*, Politechnika Krakowska, Kraków 2004.
- [9] Pieczonka T., *Dylatometryczna metoda wyznaczania liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej ciał stałych* ([www.kmimp.agh.edu.pl](http://www.kmimp.agh.edu.pl)) Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2012.



MONIKA GWADERA, KRZYSZTOF KUPIEC\*

## KINETYKA ADSORPCJI – ZASTOSOWANIE UŁAMKÓW ŁAŃCUCHOWYCH W PRZYBLIŻONYCH RÓWNANIACH DYFUZJI I ADSORPCJI

---

### KINETICS OF ADSORPTION – APPLICATION OF CONTINUED FRACTIONS TO APPROXIMATE EQUATIONS OF DIFFUSION AND ADSORPTION

---

#### Streszczenie

Przedstawiono przybliżony model kinetyki adsorpcji słuszny dla przypadku, gdy w układzie występują opory dyfuzyjne w ziarnie adsorbentu oraz opory zewnętrzne w płynie. W modelu zastosowano uproszczenie ścisłego rozwiązania równania dyfuzji oparte na aproksymacji ułamkami łańcuchowymi. Porównano przebiegi zależności stężenia składnika w ziarnie od czasu adsorpcji dla modelu przybliżonego i ścisłego.

*Słowa kluczowe: równanie dyfuzji i adsorpcji, przybliżone równanie kinetyki adsorpcji, ułamki łańcuchowe*

#### Abstract

An approximate model of adsorption kinetics valid for systems with diffusive resistance in an adsorbent pellet and external resistance in a fluid was presented. A simplification of the exact solution of the equation of diffusion based on approximation with continued fractions was used in the model. Relationships between concentration in a pellet and adsorption time obtained with the approximate and exact model were compared.

*Keywords: equation of diffusion and adsorption, approximate equation of adsorption kinetics, continued fractions*

---

\* Mgr inż. Monika Gwadera, dr hab. inż. Krzysztof Kupiec, prof. PK, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

## Oznaczenia

|              |  |
|--------------|--|
| $A, \bar{A}$ | – lokalna i średnia bezwymiarowa zawartość składnika w ziarnie |
| $Bi$         | – liczba Biota   |
| $D_e$        | – efektywny współczynnik dyfuzji, $m^2/s$                      |
| $k_g$        | – współczynnik wnikania masy, $m/s$                            |
| $R$          | – promień ziarna, $m$  |
| $q$          | – zawartość składnika w ziarnie, $kg$ składnika/ $kg$ ziaren   |
| $t$          | – czas, $s$  |
| $\eta$       | – bezwymiarowa współrzędna położenia                           |
| $\tau$       | – bezwymiarowy czas  |

## Indeksy

|     |                       |
|-----|-----------------------|
| $b$ | – rdzeń płynu         |
| $i$ | – wartość początkowa  |
| $l$ | – powierzchnia ziarna |

## 1. Wstęp

W instalacjach adsorpcyjnych zawartość równowagowa składnika w ziarnach adsorbentu jest praktycznie nieosiągnana. Wynika to ze skończonej szybkości procesów przenoszenia masy i powoduje, że złożo adsorbentu zostaje wcześniej „przebite” niż nasycone. Uwzględnienie zależności kinetycznych przy projektowaniu adsorberów jest zatem konieczne.

Szybkość adsorpcji jest limitowana poprzez najwolniejszy etap (etapy) całego złożonego procesu, na który składają się transport składnika z rdzenia fazy płynnej do powierzchni ziarna adsorbentu (wnikanie), dyfuzja w makroporach ziarna, dyfuzja w mikroporach oraz właściwy akt adsorpcji. Ten ostatni etap nie jest na ogół dominujący, a więc na szybkość procesu adsorpcji wpływają głównie etapy transportu składnika do miejsca zaadsorbowania. W celu uproszczenia modelu kinetycznego często zakłada się dominację dyfuzji w mikro- lub makroporach, sprowadzając rozważania nad szybkością adsorpcji do problemu, w którym występują tylko dwa szeregowo opory dyfuzyjne: opory zewnętrznego wnikania oraz opory dyfuzji w ziarnie adsorbentu (w mikro- lub makroporach).

Modele dyfuzji w mikro- i makroporach różnią się tym, że w równaniach dyfuzji występują inne rodzaje stężeń adsorbowanego składnika. Przy dyfuzji w mikroporach stężenia są odnoszone do objętości fazy stałej, zaś przy dyfuzji w makroporach operuje się stężeniami fazy płynnej. Przy modelowaniu te różnice stają się nieistotne, gdy analizowany układ adsorpcyjny charakteryzuje się liniową równowagą.

Jeżeli opory zewnętrznego wnikania stanowią niewielki udział w całkowitym oporze przenoszenia masy, to kinetykę adsorpcji charakteryzuje tylko współczynnik dyfuzji w ziarnie; w przeciwnym przypadku na kinetykę adsorpcji ma wpływ również współczynnik wnikania składnika z rdzenia fazy płynnej do powierzchni ziarna. Relację pomiędzy wewnętrznym i zewnętrznym oporem przenoszenia wyraża liczba Biota będąca stosunkiem tych dwóch oporów i definiowana następująco:

$$Bi = \frac{k_g R}{D_e} \quad (1)$$

Jeśli udział zewnętrznego oporu wnikania w całkowitym oporze przenoszenia jest niewielki, liczba Biota ma dużą wartość. Gdy  $Bi > 100$ , można uznać, że opory dyfuzyjne występują tylko wewnątrz ziarna. Na ogół zewnętrzny opór istotnie wpływa na kinetykę procesu i powinien być uwzględniany.

W ścisłych modelach kinetyki adsorpcji występują równania różniczkowe cząstkowe, w których zmiennymi niezależnymi są współrzędna położenia w ziarnie adsorbentu i czas. Rozwiązywanie tego typu zależności jest czasochłonne. Problem czasochłonności rozwiązań jest szczególnie istotny w przypadku, gdy adsorpcja zachodzi w złożu, a nie w pojedynczym ziarnie. Ponadto często rozwiązywanie jest wykonywane wielokrotnie w ramach złożonej procedury. Dlatego też korzystne jest do opisu matematycznego nieustalonego przenoszenia masy zastosować takie uproszczenie, które poskutkuje wyeliminowaniem zmiennej położenia w ciele (ziarnie). Otrzymana zależność nazywana jest przybliżonym równaniem kinetycznym. Po wyeliminowaniu współrzędnej położenia proces jest opisany równaniem różniczkowym zwyczajnym lub układem takich równań.

Istnieje wiele przybliżonych równań kinetycznych [1–5]. Najbardziej znana jest zależność LDF Glueckaufa [1], która dla przypadku adsorpcji w ziarnie kulistym ma postać:

$$\frac{d\bar{A}}{d\tau} = 15 (A_1 - \bar{A}) \quad (2)$$

gdzie  $A_1$  jest bezwymiarowym stężeniem na powierzchni ziarna. Równanie LDF dla krótkich czasów trwania procesu daje jednak niedokładne wyniki, co znacznie ogranicza jego stosowanie.

Ostatnio, przy opracowywaniu przybliżonych równań kinetycznych wykorzystywane są ułamki łańcuchowe [6–8]. Ze względu na niezbyt szerokie rozpowszechnienie tego typu narzędzia aproksymacyjnego, ułamki te omówiono w następnym podrozdziale.

W niniejszym artykule zmodyfikowano model Lee i Kima [6] oparty na aproksymacji ułamiakami łańcuchowymi i dotyczący braku zewnętrznych oporów dyfuzyjnych. Zastosowany uogólniony model dotyczy jednoczesnego występowania wewnętrznych i zewnętrznych oporów dyfuzyjnych. Przedstawiony model dotyczy adsorpcji w ziarnach kulistych.

## 2. Ułamki łańcuchowe

Skóńczony ułamek łańcuchowy to wyrażenie o postaci:

$$a_0 + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{a_3 + \dots + a_k}}} \quad (3)$$

gdzie ogniwo  $a_0$  jest liczbą całkowitą, a kolejne ogniwa  $a_i$  to liczby naturalne, przy czym ostatnie ogniwo jest większe od 1. Dla zaoszczędzenia miejsca zamiast wyrażenia (3) zapisuje się często:

$$[a_0; a_1, a_2, a_3, \dots, a_k] \quad (4)$$

Ułamek o nieskończonej liczbie członów to nieskończony ułamek łańcuchowy. Jeśli liczby  $a_i$  powtarzają się cyklicznie, wyrażenie (3) jest ułamkiem łańcuchowym okresowym. Jeśli ułamek łańcuchowy zostanie obcięty po  $n$ -tym ogniwie  $a_n$ , otrzymywany jest  $n$ -ty redukt ułamka łańcuchowego.

Każdą liczbę rzeczywistą można jednoznacznie przedstawić w postaci ułamka łańcuchowego. W przypadku liczb wymiernych, ułamki łańcuchowe są skończone, a dla liczb niewymiernych – nieskończone. Algorytm rozwijania liczb rzeczywistych w skończony ułamek łańcuchowy jest oparty na dwóch powtarzanych naprzemiennie krokach [9]:

- 1) wydzielenie całkowitej części danej liczby – liczba jest zapisywana jako suma liczby całkowitej i reszty mniejszej od 1,
- 2) przedstawienie reszty jako jedynki podzielonej przez liczbę większą od 1; po wykonaniu tej operacji, należy zastosować krok 1 do mianownika tego ułamka itd.

Obowiązują zatem zależności:

$$x = a_0 + \frac{1}{x_1} \quad (5a)$$

$$x = a_0 + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{x_2}} \quad (5b)$$

$$x = a_0 + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{x_3}}} \quad (5c)$$

itd.

Przykładowo liczbę  $\pi = 3,141592653\dots$  można za pomocą ułamka łańcuchowego zapisać w postaci:

$$\pi = [3; 7, 15, 1, 292, 1, 1, \dots]$$

wynikającej z następujących przekształceń

$$\begin{aligned} a_0 &= 3 \\ x &= 3 + 0,141592653 = 3 + \frac{1}{7,062513306}; & a_1 &= 7 \\ x_1 &= 7 + 0,062513305 = 7 + \frac{1}{15,99659441}; & a_2 &= 15 \\ x_2 &= 15 + 0,996594409 = 15 + \frac{1}{1,003417228}; & a_3 &= 1 \\ x_3 &= 1 + 0,003417228 = 1 + \frac{1}{292,6348337}; & a_4 &= 292 \end{aligned}$$

Atrakcyjną właściwością ułamków łańcuchowych jest to, że obcięte ułamki łańcuchowe (redukt) stanowią najlepsze możliwe przybliżenia liczb rzeczywistych.

### 3. Równanie dyfuzji i adsorpcji

Dla adsorpcji w ziarnie bezwymiarowa zawartość pochłanianego składnika, odpowiednio lokalna i średnia, definiowana jest następująco:

$$A = \frac{q_i - q}{q_i - q_b} \quad \bar{A} = \frac{q_i - \bar{q}}{q_i - q_b} \quad (6a \text{ i } b)$$

gdzie:

- $\bar{q}$  – zawartość zaadsorbowanego składnika uśredniona po objętości ziarna,
- $q_i$  – zawartość początkowa,
- $q_b$  – zawartość równowagowa w stosunku do stężenia w rdzeniu płynu (dla adsorpcji  $q_b \neq 0$ ).

Dla ziaren kulistych równanie dyfuzji i adsorpcji ma postać:

$$\frac{\partial A}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 A}{\partial \eta^2} + \frac{2}{\eta} \cdot \frac{\partial A}{\partial \eta} \quad (7)$$

To równanie rozważono łącznie z warunkiem początkowym:

$$\tau = 0; A = 0 \quad (8)$$

oraz warunkami brzegowymi. Warunek dla środka ziarna ma postać:

$$\eta = 0; \frac{\partial A}{\partial \eta} = 0 \quad (9)$$

Postać warunku dla powierzchni ziarna zależy od relacji pomiędzy oporami dyfuzyjnymi w ziarnie i na zewnątrz ziarna. Gdy opory na zewnątrz ziarna można pominąć ( $Bi \rightarrow \infty$ ), warunek ma postać:

$$\eta = 1; A_1 = 1 \quad (10)$$

Gdy obok oporów w ziarnie uwzględniamy również opory zewnętrzne, warunek brzegowy dla powierzchni ziarna jest następujący:

$$\eta = 1; \frac{\partial A}{\partial \eta} = Bi(1 - A_1) \quad (11)$$

Średnie stężenie w ziarnie kulistym wynosi:

$$\bar{A} = 3 \int_0^1 \eta^2 A \cdot d\eta \quad (12)$$

#### 4. Przybliżony model Lee i Kima dla ziaren kulistych

W pracy Lee i Kima [6] przedstawiono nowe podejście do problemu uproszczonych równań kinetyki adsorpcji. Przedstawiony model opiera się na wykorzystaniu przekształcenia Laplace'a dla równania dyfuzji, przekształceniu rozwiązania do postaci ułamków łańcuchowych i obcięciu otrzymanego wyrażenia do takiej liczby członów, która zapewnia żadaną dokładność. Autorzy swoje rozważania skoncentrowali na układach, w których zachodzi reakcja chemiczna pierwszego rzędu, ale nie występują zewnętrzne opory dyfuzyjne. Stwierdzono, że proponowany model jest zgodny z rozwiązaniem ścisłym, ale należy uwzględnić odpowiednią liczbę członów w ułamkach łańcuchowych określających rząd aproksymacji  $n$ . Aproksymacja pierwszego rzędu ( $n = 1$ ) odpowiada równaniu LDF. Im krótszy czas procesu, tym niezbędny rząd aproksymacji musi być większy, aby uzyskać akceptowalną dokładność aproksymacji. Autorzy stosowali w obliczeniach rzędy aproksymacji nieprzekraczające  $n = 4$ .

W celu znalezienia wartości  $\bar{A}$  na podstawie przybliżonego modelu Lee i Kima należy rozwiązać następujący układ równań różniczkowych zwyczajnych:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{a}\mathbf{x} + \mathbf{b}A_1 \quad (13)$$

gdzie wektory  $\dot{\mathbf{x}}$ ,  $\mathbf{x}$  oraz  $\mathbf{b}$  są zdefiniowane następująco:

$$\dot{\mathbf{x}} = [\dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad \dots \quad \dot{x}_n]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n]^T \quad (15)$$

$$\mathbf{b} = [3 \quad 3 \quad \dots \quad 3]^T \quad (16)$$

natomiast macierz  $\mathbf{a}$ :

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} -p_1q_1 & -p_1q_2 & -p_1q_3 & \dots & -p_1q_{n-1} & -p_1q_n \\ -p_1q_1 & -p_2q_2 & -p_2q_3 & \dots & -p_2q_{n-1} & -p_1q_n \\ -p_1q_1 & -p_2q_2 & -p_3q_3 & \dots & \dots & -p_1q_n \\ \dots & \dots & -p_3q_3 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & -p_2q_2 & \dots & \dots & -p_{n-1}q_{n-1} & -p_{n-1}q_n \\ -p_1q_1 & -p_2q_2 & -p_3q_3 & \dots & -p_{n-1}q_{n-1} & -p_nq_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

przy czym wartości  $p_i$  i  $q_i$  wynoszą:

$$p_i = 2i^2 + i \quad (18)$$

$$q_i = 4i + 1 \quad (19)$$

Wielkość  $n$  oznacza rząd aproksymacji. Jest on tożsamy z liczbą członów ułamka łańcuchowego przybliżającego rozwiązanie dokładne. Układ równań (13) należy rozwiązać z warunkiem początkowym:

$$\tau = 0; \mathbf{x} = 0 \quad (20)$$



W wyniku rozwiązania układu równań różniczkowych (13) otrzymywana jest funkcja wektorowa  $\mathbf{x}(\tau)$ , na podstawie której wyznacza się funkcję skalarną  $\bar{A}(\tau)$  wg wzoru:

$$\bar{A} = \mathbf{q}\mathbf{x} \quad (21)$$

### 5. Uogólnienie modelu Lee i Kima

W modelu Lee i Kima przyjęto dla etapu adsorpcji  $A_1 = 1$ , co jest równoznaczne z brakiem oporów dyfuzyjnych na zewnątrz ziarna. Aby uwzględnić zewnętrzne opory wnikania masy, należy uwzględnić warunek (11) (zamiast warunku (10)). Różniczkując po czasie zależność (12), otrzymano:

$$\frac{\partial \bar{A}}{\partial \tau} = 3 \int_0^1 \eta^2 \frac{\partial A}{\partial \tau} d\eta$$

Podstawiając za pochodną  $\partial A / \partial \tau$  prawą stronę równania (7), otrzymano po przekształceniach

$$\frac{\partial \bar{A}}{\partial \tau} = 3 \int_0^1 \eta^2 \left( \frac{\partial^2 A}{\partial \eta^2} + \frac{2}{\eta} \frac{\partial A}{\partial \eta} \right) d\eta = 3 \int_0^1 \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \eta^2 \frac{\partial A}{\partial \eta} \right) d\eta = 3 \left[ \eta^2 \frac{\partial A}{\partial \eta} \right]_0^1 = 3 \left( \frac{\partial A}{\partial \eta} \right)_1$$

Po uwzględnieniu warunku brzegowego (11), dostajemy

$$\frac{d\bar{A}}{d\tau} = 3 \text{Bi} (1 - A_1) \quad (22)$$

Uwzględniając w równaniach różniczkowych (13) zależność na  $A_1$  wynikającą z (22), otrzymuje się

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{d}^{-1} \mathbf{a}\mathbf{x} + \mathbf{d}^{-1} \mathbf{b} \quad (23)$$

gdzie:

$$\mathbf{d} = \mathbf{1} + \frac{1}{3 \text{Bi}} \cdot \mathbf{b}\mathbf{q} \quad (24)$$

Układ równań różniczkowych (23) należy scałkować z warunkiem początkowym (20), a następnie rozwiązanie podstawić do (21).

Jak łatwo wykazać, gdy opory zewnętrzne można zaniedbać ( $\text{Bi} \rightarrow \infty$ ), to  $\mathbf{d} = \mathbf{1}$  i równanie (23) staje się identyczne z (13).

Dla niewielkich rzędów aproksymacji (np.  $n = 1$  lub  $n = 2$ ) równania modelu można rozwiązać analitycznie.

## 6. Rozwiązanie analityczne dla $n = 1$

Na wstępie według (18) i (19) wyznaczono:  $p_1 = 3$ ,  $q_1 = 5$ . Macierz  $\mathbf{a}$  oraz wektory  $\mathbf{b}$  i  $\mathbf{d}$  są skalarami:  $\mathbf{a} = a = -15$ ,  $\mathbf{b} = b = 3$ . Wartość  $d$ , według wzoru (24), wynosi:

$$\mathbf{d} = d = 1 + \frac{1}{3Bi} \cdot 3 \cdot 5 = 1 + \frac{5}{Bi}$$

zaś jej odwrotność:

$$\mathbf{d}^{-1} = d^{-1} = \frac{Bi}{Bi+5}$$

W dalszej kolejności obliczono  $\mathbf{d}^{-1}\mathbf{a} = -15Bi/(Bi+5)$  oraz  $\mathbf{d}^{-1}\mathbf{b} = 3Bi/(Bi+5)$ . Równanie różniczkowe ma postać:

$$\dot{\mathbf{x}} = \dot{x} = -\frac{15Bi}{Bi+5}x + \frac{3Bi}{Bi+5}$$

z warunkiem  $x = 0$  dla  $\tau = 0$ . Rozwiązaniem jest:

$$\mathbf{x} = x = \frac{1}{5} - \frac{1}{5} \cdot \exp\left(-\frac{15}{1+5/Bi} \cdot \tau\right)$$

Ostatecznie należy wyznaczyć wielkość  $\bar{A} = \mathbf{q}\mathbf{x}$ :

$$\bar{A} = 1 - \exp\left(-\frac{15}{1+5/Bi} \cdot \tau\right) \quad (25)$$

Po zróżniczkowaniu i uwzględnieniu zależności (22), otrzymuje się równanie LDF. Przykładowo dla  $Bi = 5$  przybliżone równanie kinetyczne ma postać:

$$\bar{A} = 1 - \exp\left(-\frac{15}{2} \cdot \tau\right) \quad (26)$$

Natomiast dla  $Bi \rightarrow \infty$

$$\bar{A} = 1 - \exp(-15 \cdot \tau) \quad (27)$$

## 7. Rozwiązanie analityczne dla $n = 2$

### 7.1. Skończona wartość liczby Biota: $Bi = 5$

Wartości  $p_i$  i  $q_i$  wynoszą:  $p_1 = 3$ ,  $p_2 = 10$ ,  $q_1 = 5$ ,  $q_2 = 9$ . Macierz  $\mathbf{a}$  ma postać:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} -15 & -27 \\ -15 & -90 \end{bmatrix}$$

Natomiast wektory  $\mathbf{b}$  i  $\mathbf{q}$ :

$$\mathbf{b} = [3 \ 3]^T \quad \mathbf{q} = [5 \ 9]$$

Obliczenia dla  $Bi = 5$  są następujące. Elementy macierzy  $\mathbf{d}$  wyznaczono zgodnie z zależnością (24). Otrzymano:

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 2 & 9/5 \\ 1 & 14/5 \end{bmatrix}$$

Macierz odwrotna do macierzy  $\mathbf{d}$  ma postać:

$$\mathbf{d}^{-1} = \begin{bmatrix} 14/19 & -9/19 \\ -5/19 & 10/19 \end{bmatrix}$$

Następnie wyznaczono iloczyny  $\mathbf{d}^{-1}\mathbf{a}$  oraz  $\mathbf{d}^{-1}\mathbf{b}$ :

$$\mathbf{d}^{-1}\mathbf{a} = \begin{bmatrix} -75/19 & 432/19 \\ -75/19 & -765/19 \end{bmatrix} \quad \mathbf{d}^{-1}\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 15/19 \\ 15/19 \end{bmatrix}$$

Warunki początkowe są następujące: dla  $\tau = 0$  jest  $x_1 = 0$  oraz  $x_2 = 0$ . Zgodnie z (23) układ równań różniczkowych ma postać:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -75/19 & 432/19 \\ -75/19 & -765/19 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 15/19 \\ 15/19 \end{bmatrix}$$

Rozwiązaniem analitycznym powyższego układu równań różniczkowych są następujące funkcje:

$$x_1 = 0,2 [1 - \exp(-6,6147 \cdot \tau)] + 0,017219 [\exp(-37,5958 \tau) - \exp(-6,6147 \tau)] \quad (28a)$$

$$x_2 = -0,025482 [\exp(-37,5958 \tau) - \exp(-6,6147 \tau)] \quad (28b)$$

Znając postaci funkcji  $x_1$  i  $x_2$  oblicza się wielkość  $\bar{A}$  według zależności (21):

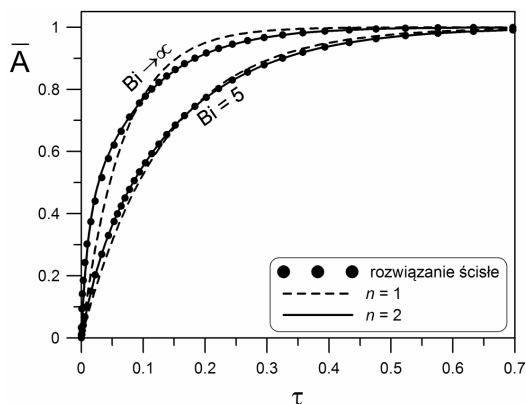
$$\bar{A} = 5x_1 + 9x_2 \quad (29)$$

## 7.2. Nieskończona wartość liczby Biota: $Bi \rightarrow \infty$

Dla  $Bi \rightarrow \infty$  jest  $\mathbf{d} = \mathbf{1}$  oraz  $\mathbf{d}^{-1} = \mathbf{1}$  i układ równań różniczkowych ma postać:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -15 & -27 \\ -15 & -90 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \end{bmatrix}$$

## 8. Wyniki obliczeń



Rys. 1. Porównanie przybliżonych przebiegów funkcji  $\bar{A}(\tau)$  dla  $n = 1$  i  $n = 2$  z przebiegami ścisłymi

Fig. 1. Comparison of exact and approximate courses of function  $\bar{A}(\tau)$  for  $n = 1$  and  $n = 2$

Przybliżone przebiegi funkcji  $\bar{A}(\tau)$  obliczone wg przedstawionego modelu wraz z przebiegami ścisłymi przedstawiono na rys. 1. Obliczenia przeprowadzono dla  $Bi = 5$  i  $Bi \rightarrow \infty$ ; dla modelu przybliżonego obliczenia dotyczyły  $n = 1$  i  $n = 2$ . Widać znacznie lepszą zgodność z rozwiązaniem dokładnym w przypadku przebiegu funkcji odpowiadającej  $n = 2$  w porównaniu z  $n = 1$ .

## 9. Wnioski

1. W celu uwzględnienia w przybliżonym modelu Lee i Kima zewnętrznych oporów przeniesienia masy, należy rozwiązać układ równań różniczkowych (23) zamiast układu (13).
2. Przedstawiony zmodyfikowany model daje wyniki zgodne z rozwiązaniem dokładnym w całym zakresie liczb Biota.
3. Zgodność przybliżonego modelu z rozwiązaniem dokładnym jest tym lepsza, im większy jest rząd aproksymacji.

## Literatura

- [1] Glueckauf E., *Theory of chromatography. Part 10 – Formula for diffusion into spheres and their application to chromatography*, Trans. Faraday Soc., Vol. 51, 1955, 1540-1551.
- [2] Liaw C., Wang J., Greenkorn R., Chao K., *Kinetics of fixed bed adsorption: A new solution*, AIChE Journal, Vol. 25, 1979, 376-381.
- [3] Do D.D., Rice R.G., *Validity of the parabolic profile assumption in adsorption studies*, A.I.Ch.E. Journal, Vol. 32, 1986, 149-154.

- [4] Szukiewicz M.K., *Approximate model for diffusion and reaction in a porous catalyst with mass-transfer resistances*, AIChE Journal, Vol. 47, 2001, 2131-2135.
- [5] Cruz P., Mendes A., Magalhaes F.D., *High-order approximations for intra-particle mass transfer*, Chem. Eng. Sci., Vol. 59, 2004, 4393-4399.
- [6] Lee J., Kim D.H., *Simple high-order approximations for unsteady-state diffusion, adsorption and reaction in a catalyst: a unified method by a continued fraction for slab, cylinder and sphere geometries*, Chemical Engineering Journal, Vol. 173, 2011, No. 2, 644-650.
- [7] Kupiec K., Gwadera M., *Approximations for unsteady state diffusion and adsorption with mass transfer resistance in both phases*, Chem. Eng. Process. 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2012.12.003>.
- [8] Gwadera M., Kupiec K., *Approximate model for transient diffusion in adsorbent pellet with external mass transfer resistance*, Materiały Konferencji InterTech, Poznań 2012, 65-69.
- [9] Cameron P.J., *A course on number theory* (<http://www.maths.qmul.ac.uk/~pjc/notes/nt.pdf> – dostęp z dnia 12.09.2012).



GRZEGORZ KACZOR\*

## NIEZAWODNOŚĆ WYBRANYCH PAR CIERNYCH PIERŚCIEŃ TŁOKOWY–TULEJA CYLINDROWA

### RELIABILITY OF CHOSEN FRICTION PAIRS OF PISTON RING–CYLINDER SLEEVE

#### Streszczenie

Problematyka niezawodności współczesnych obiektów technicznych nabiera szczególnego znaczenia ze względu na wzrost ich złożoności. Narzędziami zwiększającymi efektywność analiz niezawodności są aplikacje komputerowe umożliwiające m.in. prowadzenie symulacji czasu poprawnej pracy systemów, prognozowanie niezawodności oraz jej optymalizację. W niniejszym artykule zdecydowano się wykorzystać aplikację Weibull++ do modelowania niezawodności skojarzenia pierścieni tłokowy–tuleja cylindrowa na podstawie danych empirycznych przedstawionych w pracy [5].

*Słowa kluczowe: analiza niezawodności, pierścień tłokowy, tuleja cylindrowa, metoda największej wiarygodności*

#### Abstract

The problems of reliability of modern technical facilities is of particular importance due to the increase in their complexity. The tools that increase the efficiency of reliability analysis are computer applications, including simulation of reliability, prediction and optimization. In this paper, it was decided to use the Weibull++ application to associate reliability modeling piston ring – cylinder sleeve based on life data presented in.

*Keywords: reliability analysis, piston ring, cylinder sleeve, maximum likelihood method*

\* Mgr inż. Grzegorz Kaczor, Instytut Pojazdów Szynowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Problem niezawodności współpracy pierścieni tłokowych z tulejami cylindrów był w literaturze wielokrotnie omawiany [3, 5, 7]. Wspomniane rodzaje par ciernych są elementami wykonywanymi z zachowaniem szczególnej precyzji, od których wymaga się jednocześnie wysokich właściwości tribologicznych (ograniczenie strat energii związanych z tarcieniem) i wytrzymałościowych (wysoka granica plastyczności, udarność, wytrzymałość na ściskanie i zginanie).

Szczególne znaczenie przy prowadzeniu analiz niezawodności złożonych obiektów technicznych nabiera wykorzystanie metod symulacji komputerowych z użyciem specjalistycznego oprogramowania, które pozwala m.in. wyznaczyć podstawowe charakterystyki funkcyjne niezawodności oraz dokonać jej prognozy. Jest to istotne przede wszystkim ze względu na charakter zjawisk fizycznych oddziałujących na obiekty. Losowość towarzysząca ich pracy sprawia, że nie może ona być opisana w sposób deterministyczny i utrudnia proces wnioskowania. Ponadto, zbiór informacji o funkcjonowaniu tych obiektów w zmieniających się warunkach otoczenia może wykazywać znaczną obszerność, co dodatkowo zwiększa czasochłonność analizy i wprowadza znaczny stopień jej komplikacji. Warto również wziąć pod uwagę niepewność wyników badań poddanych analizie. Pojawiają się błędy pomiarowe, których wielkość można określić za pomocą przedziałów ufności. Powyższe problemy dotyczące budowy właściwego modelu są jednocześnie przeciwstawione wzrostem odpowiedzialności obiektu rzeczywistego za powierzone mu zadania i stawiane wymagania.

Celem niniejszego artykułu było zastosowanie nowoczesnych metod wspomaganie komputerowego do oceny niezawodności pary cierniej na przykładzie skojarzenia pierścieni tłokowy–tuleja. Dodatkowo, wyznaczono zbiór kryteriów podobieństwa mechanicznego, które posłużą do przeniesienia otrzymanych wyników na obiekt rzeczywisty.

## 2. Zakres analizy wyników badań

Do analizy niezawodności pary cierniej pierścieni tłokowy–tuleja cylindrowa z użyciem specjalistycznego oprogramowania komputerowego wykorzystano wyniki badań z etapu I pracy [5], która dotyczyła określenia wpływu procesu zacierania na niezawodność i trwałość pierścieni tłokowych. Powstanie pracy [5] było podyktowane zaistniałą sytuacją, której koniecznością stała się rezygnacja z kosztownego importu zagranicznych pierścieni tłokowych na rzecz uruchomienia produkcji krajowej.

W celu dokonania analizy przyjęto dwuparametryczny rozkład Weibulla, którego funkcja gęstości prawdopodobieństwa dana jest następującą zależnością [8]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta} \quad (1)$$

gdzie:

- $\beta$  – parametr kształtu,
- $\eta$  – parametr skali.



Do estymacji parametrów modelu matematycznego wykorzystano metodę największej wiarygodności, stosowaną powszechnie w statystyce ze względu na jej wszechstronność oraz wysoką dokładność. Funkcja maksymalnej wiarygodności dana jest następującą zależnością [8]:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^R f(x_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (2)$$

gdzie:

- $x$  – zmienna losowa typu ciągłego,  
 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k]$  – zbiór poszukiwanych parametrów.

Poszukiwane wartości parametrów  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$  otrzymuje się poprzez maksymalizację wyrażenia (2).

Średnie wartości czasu poprawnej pracy pary oraz średnie wartości temperatur, przy których dochodziło do zatarcia pary pierścieni tłokowy – tuleja cylindrowa wyznaczono z zależności (3):

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (3)$$

gdzie:

- $f(t)$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa.

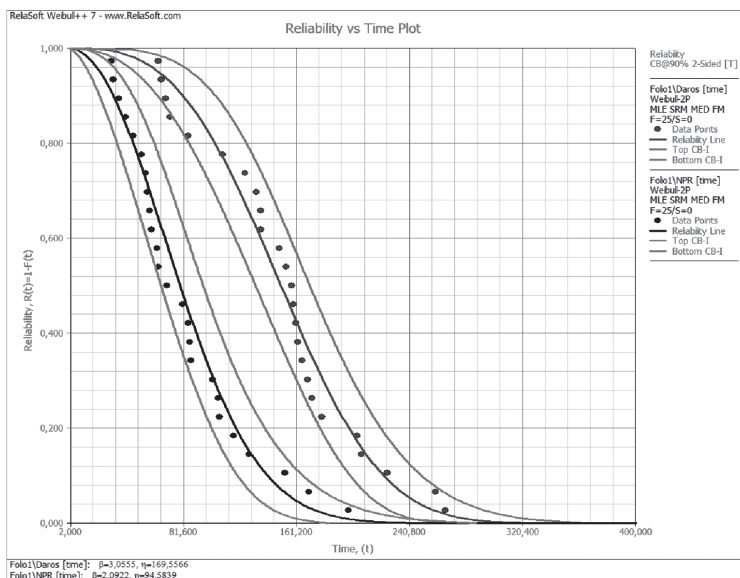
Dla badanych próbek firm „Daros” oraz „NPR” wyznaczono średnie wartości czasu oraz temperatury, przy których dochodziło do zatarcia. Przedstawiono również porównawcze charakterystyki funkcji niezawodności z obustronnymi przedziałami ufności na poziomie 0,9 oraz porównawcze charakterystyki funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla obu próbek w odniesieniu do czasu poprawnej pracy i temperatury zatarcia.

### 3. Analiza niezawodności pary ciernej

Dane do analizy zostały przedstawione w tabeli 1. Dotyczą one czasów poprawnej pracy badanych próbek, dla których przejście do stanu niezdatności odpowiadało chwili wystąpienia ich zatarciu. Zebrano również wartości temperatur zacierających się próbek.

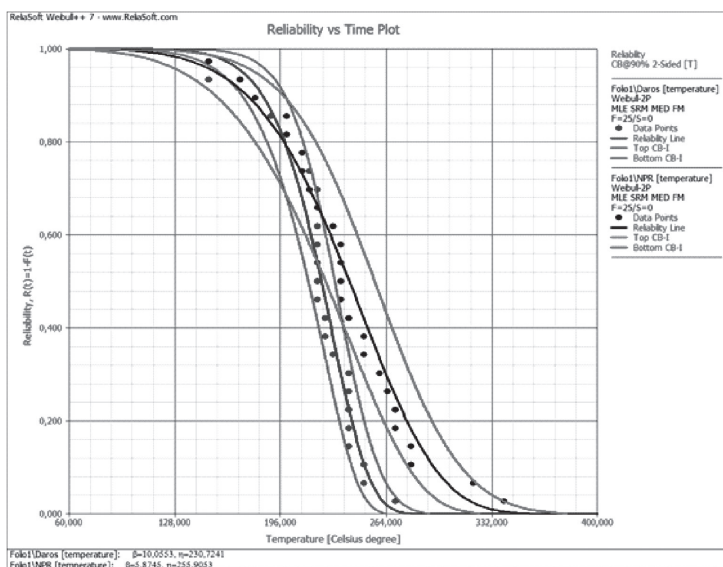
**Czas pracy i odpowiadająca mu temperatura zatarcia dla badanych próbek [5]**

| Lp. | Daros          |                  | NPR            |                  |
|-----|----------------|------------------|----------------|------------------|
|     | czas pracy [s] | temperatura [°C] | czas pracy [s] | temperatura [°C] |
| 1   | 64             | 230              | 31             | 235              |
| 2   | 66             | 220              | 32             | 170              |
| 3   | 69             | 220              | 36             | 220              |
| 4   | 72             | 250              | 41             | 210              |
| 5   | 85             | 240              | 46             | 230              |
| 6   | 109            | 200              | 52             | 265              |
| 7   | 125            | 220              | 55             | 150              |
| 8   | 133            | 180              | 56             | 240              |
| 9   | 136            | 225              | 58             | 210              |
| 10  | 136            | 240              | 59             | 200              |
| 11  | 149            | 220              | 63             | 280              |
| 12  | 154            | 240              | 64             | 260              |
| 13  | 158            | 210              | 70             | 250              |
| 14  | 159            | 150              | 81             | 280              |
| 15  | 161            | 270              | 85             | 235              |
| 16  | 162            | 150              | 86             | 270              |
| 17  | 165            | 240              | 87             | 320              |
| 18  | 169            | 240              | 102            | 200              |
| 19  | 172            | 250              | 106            | 235              |
| 20  | 179            | 225              | 107            | 215              |
| 21  | 204            | 215              | 117            | 180              |
| 22  | 207            | 220              | 128            | 235              |
| 23  | 225            | 220              | 153            | 340              |
| 24  | 259            | 220              | 170            | 270              |
| 25  | 266            | 190              | 198            | 250              |



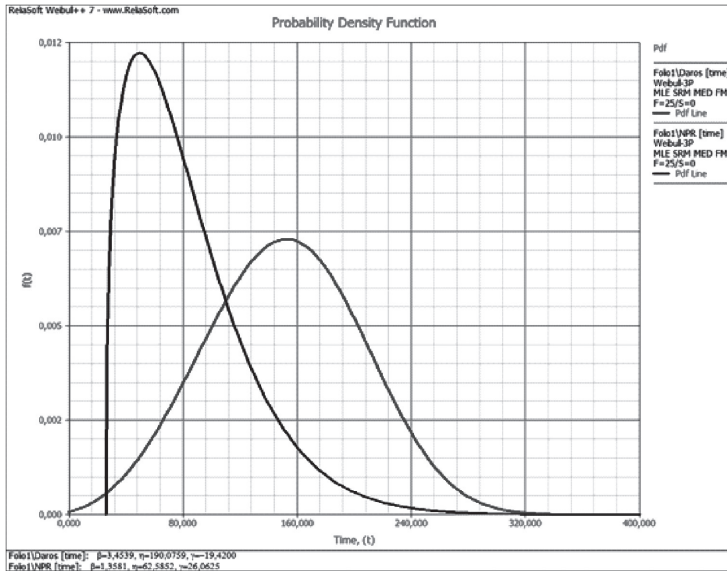
Rys. 1. Charakterystyki niezawodności pierścieni „Daros” oraz „NPR” w odniesieniu do czasu pracy z obustronnymi przedziałami ufności

Fig. 1. Reliability plots of piston rings “Daros” and “NPR” in relation to operating time with two sided confidence bounds



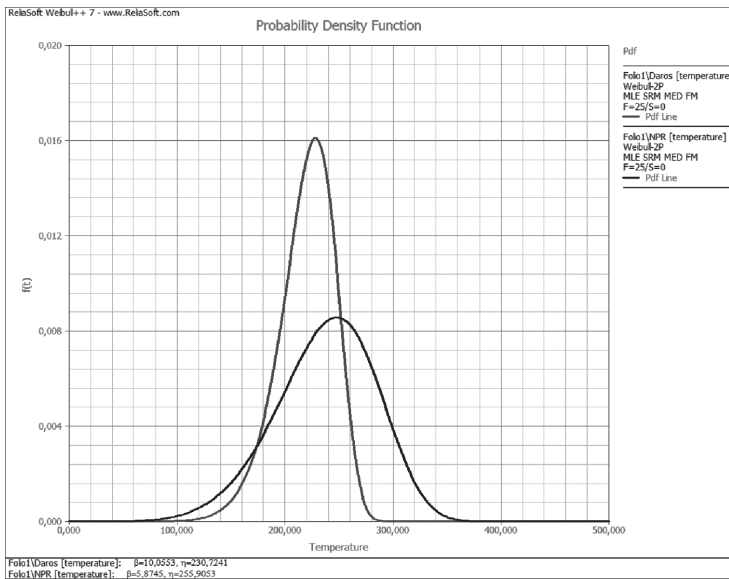
Rys. 2. Charakterystyki niezawodności pierścieni „Daros” oraz „NPR” w odniesieniu do temperatury zatarcia z obustronnymi przedziałami ufności

Fig. 2. Reliability plots of piston rings “Daros” and “NPR” in relation to seizing temperature with two sided confidence bounds



Rys. 3. Charakterystyki gęstości prawdopodobieństwa pierścieni „Daros” oraz „NPR” w odniesieniu do czasu pracy

Fig. 3. Probability density plots of piston rings “Daros” and “NPR” in relation to operating time



Rys. 4. Charakterystyki gęstości prawdopodobieństwa pierścieni firmy „Daros” oraz „NPR” w odniesieniu do temperatury zatarcia

Fig. 4. Probability density plots of piston rings “Daros” and “NPR” in relation to seizing temperature

Średnie wartości czasu poprawnej pracy oraz temperatur, przy których dochodziło do zatarcia badanych próbek, przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

### Średnie wartości czasu poprawnej pracy i temperatur do zatarcia

| Daros                             |                                   | NPR                               |                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| średni czas pracy do zatarcia [s] | średnia temperatura zatarcia [°C] | średni czas pracy do zatarcia [s] | średnia temperatura zatarcia [°C] |
| 151,53                            | 219,55                            | 83,78                             | 237,13                            |

Dokonując porównania charakterystyk prawdopodobieństwa poprawnej pracy próbek obu typów oraz średnie wartości czasów i temperatur, przy których dochodziło do zatarcia, można stwierdzić, że znacznie większą niezawodnością wykazują się pierścienie firmy „Daros”. Można to zauważyć przede wszystkim w przypadku odniesienia do czasu pracy, gdzie próbki firmy „Daros” wykazują niemal dwukrotnie wyższą przewagę nad próbkami „NPR”. W przypadku analizy temperatury zatarcia różnica wartości obu próbek nie jest już tak wyraźnie zauważalna, ale w tym przypadku przemawia na korzyść próbek „NPR”.

W poddanym analizie skojarzeniu pierścieni tłokowy–tuleja cylindrowa wiodącym procesem zużycia prowadzącym do wystąpienia stanu niezdatności jest zużycie adhezyjne z głębokim wyrywaniem [5]. Ponadto do zatarcia dochodzi zawsze przy częściowym udziale zużycia cieplnego, spowodowanego zrywaniem mostków tarciovych i nadtopieniem cząstek współpracujących elementów. Istotnym czynnikiem w procesie kształtowania niezawodności omawianej pary kinematycznej jest również stereometria powierzchni trących elementów oraz jej zmiana w procesie eksploatacji technicznej.

#### 4. Analiza wymiarowa

Istotnym etapem analizy wyników badań eksperymentalnych na modelach jest wyznaczenie kryteriów podobieństwa mechanicznego, które pozwalają odnieść te wyniki do obiektów rzeczywistych. Pomocne w te kwestii jest zastosowanie analizy wymiarowej, będącej narzędziem matematycznym do wyznaczania bezwymiarowych parametrów modelowanego procesu tribologicznego [1, 6].

Przyjęto, że na zatarcie badanego skojarzenia mają wpływ następujące parametry:

- współczynnik długości nośnej profilu chropowatości  $tp$  [%],
- chropowatość powierzchni próbki wyrażona parametrem  $R_{a1}$  [ $\mu\text{m}$ ],
- chropowatość powierzchni przeciwpróbki wyrażona parametrem  $R_{a2}$  [ $\mu\text{m}$ ],
- obciążenie normalne styku  $Q$  [N],
- objętość próbki  $Vp$  [ $\text{m}^3$ ],
- częstotliwość zmian obciążenia  $n$  [Hz],
- zastępczy moduł sprężystości materiałów pary ciernej  $E$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ],
- prędkość względna poślizgu  $v$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Zbiór parametrów determinujących niezawodność pary ciernej można zatem opisać za pomocą następującej funkcji:

$$\Omega = F(t_p, R_{a1}, R_{a2}, Q, V_p, n, E, v) \quad (4.1)$$

Wykorzystując uproszczoną formę przekształceń, przedstawioną w pracy Nowaka [6], otrzymano następującą macierz wymiarową:

Tabela 3

**Macierz wymiarowa przyjętych parametrów skojarzenia**

|          | $p_0$ | $p_1$    | $p_2$    | $p_3$ | $p_4$ | $p_5$ | $p_6$ | $p_7$ |
|----------|-------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | $t_p$ | $R_{a1}$ | $R_{a2}$ | $V_p$ | $E$   | $Q$   | $n$   | $v$   |
| <b>L</b> | 0     | 0        | 0        | 3     | 1     | 1     | 0     | 1     |
| <b>M</b> | 0     | -1       | -1       | 0     | -1    | 1     | 0     | 0     |
| <b>T</b> | 0     | 0        | 0        | 0     | -2    | -2    | -1    | -1    |

gdzie w przyjętym układzie SI:  $L$  [m] – długość,  $M$  [kg] – masa,  $T$  [s] – czas.

Analiza wymiarowa opiera się na wykorzystaniu wyznacznika macierzy trzech parametrów podstawowych, które są związane (oznaczone w tabeli pogrubioną ramką), tzn.  $D_0 \neq 0$ . Stosując twierdzenie Buckinghama [1], można przekształcić zapis 4.1. w postać bezwymiarowych liczb kryterialnych:

$$\pi_0 = F(\pi_1 \dots \pi_i) \quad (4.2)$$

Z powyższej macierzy otrzymuje się układ równań wymiarowych:

$$\begin{aligned} 3p_3 + p_4 + p_5 + p_7 &= 0 \\ -p_1 - p_2 - p_4 + p_5 &= 0 \\ -2p_4 - 2p_5 - p_6 - p_7 &= 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Układ ten został rozwiązany względem parametrów związanych, do których należą:  $p_5, p_6, p_7$ :

$$\begin{aligned} p_5 &= p_1 + p_2 + p_4 \\ p_6 &= -p_1 - p_2 + 3p_3 - 2p_4 \\ p_7 &= -p_1 - p_2 - 3p_3 - 2p_4 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Macierz rozwiązań została przedstawiona w tabeli 4.

**Macierz rozwiązań wielkości fizycznych odwzorowanych w modelu**

| $\pi_i$ | $p_0$ | $p_1$    | $p_2$    | $p_3$ | $p_4$ | $p_5$ | $p_6$ | $p_7$ |
|---------|-------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | $t_p$ | $R_{a1}$ | $R_{a2}$ | $Q$   | $V_p$ | $n$   | $E$   | $v$   |
| $\pi_0$ | 1     | 0        | 0        | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| $\pi_1$ | 0     | 1        | 0        | 0     | 0     | 1     | -1    | -1    |
| $\pi_2$ | 0     | 0        | 1        | 0     | 0     | 1     | -1    | -1    |
| $\pi_3$ | 0     | 0        | 0        | 1     | 0     | 0     | 3     | -3    |
| $\pi_4$ | 0     | 0        | 0        | 0     | 1     | 1     | -2    | -2    |

Zestaw zgrupowanych parametrów, tzw. kompleksów będących wynikami analizy wymiarowej, jest następujący:

$$\pi_0 = t_p = \pi_1 = \frac{R_{a1} \cdot n}{E \cdot v}; \pi_2 = \frac{R_{a2} \cdot n}{E \cdot v}; \pi_3 = \frac{Q \cdot 3E}{v^{-3}}; \pi_4 = \frac{V_p \cdot n}{E^{-2} \cdot v^{-2}} \quad (4.5)$$

Wyrażenie 4.5. zgodnie z twierdzeniem Buckinghama sprowadza się do postaci bezwymiarowej:

$$t_p = f\left(\frac{R_{a1} \cdot n}{E \cdot v}, \frac{R_{a2} \cdot n}{E \cdot v}, \frac{Q \cdot 3E}{v^{-3}}, \frac{V_p \cdot n}{E^{-2} \cdot v^{-2}}\right) \quad (4.6)$$

Postać funkcji  $f$  można wyznaczyć wyłącznie na drodze doświadczalnej.

## 5. Wnioski

W niniejszym artykule dokonano analizy niezawodności skojarzenia pierścieni tłokowo-tuleja cylindrowa na podstawie wyników przeprowadzonych badań. Analiza wykazała znaczne rozbieżności między charakterystykami niezawodnościowymi pierścieni firm „Doros” i „NPR”. Różnice te są dowodem na szeroką skalę problemu optymalizacji niezawodności obiektów technicznych ze względu na ich prawdopodobieństwo poprawnej pracy, istotnego nie tylko dla ich producentów, ale również eksploatorów. Znaczenie wspomnianego wyżej problemu stało się podstawą do poszukiwania nowoczesnych rozwiązań w zakresie jego rozwiązywania. Jednymi z nich są kompleksowe i elastyczne aplikacje komputerowe pozwalające na rzetelną analizę niezawodności systemów, które stają się coraz bardziej złożone. Dodatkowe wykonanie analizy wymiarowej i wyznaczenie kryteriów podobieństwa, których zachowanie w stopniu wystarczającym spełnia wymagania kryteriów podobieństwa mechanicznego okazało się wygodną i przydatną metodą odnoszenia otrzymanych wyników do obiektów rzeczywistych.

## Literatura

- [1] Buckingham E., *On Physically Similar Systems*, Physical Reviews IV, IV 1914, 4.
- [2] Guzowski S., *Analiza zużycia frettingowego w połączeniach wciskowych na przykładzie osi zestawów kołowych pojazdów szynowych*, Monografia 284, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2003.
- [3] Kaczor G., *Analiza niezawodności układu wtryskowego typu Common Rail*, praca dyplomowa magisterska, Kraków 2011.
- [4] Manzini R., Regatierra A., Pham H., Ferrari E., *Maintenance for Industrial Systems*, Springer Series in Reliability Engineering, 2010.
- [5] Lisowski Z. i in., *Wpływ wybranych parametrów fizykalnych żeliwnych pierścieni tłokowych silników spalinowych dużej mocy na proces mikrozacierania. Etap I*, IPSz, Politechnika Krakowska, Kraków 1979.
- [6] Nowak Z., *Ogólna metoda wyznaczania zupełnego układu iloczynów bezwymiarowych*, Czasopismo Techniczne z. 6, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1969.
- [7] Wajand A., Wajand T., *Tłokowe silniki spalinowe średnio i szybkoobrotowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993, 2005.
- [8] *Life Data Analysis Reference*, Weibull++ 7. Reliasoft Corporation, Tucson AZ USA 1999–2007.



MAŁGORZATA KICA, SYLWIA RONKA\*

## SELEKTYWNE USUWANIE HERBICYDÓW Z WODY Z UŻYCIEM MODYFIKOWANEGO POLIDIWINYLOBENZENU

---

### SELECTIVE HERBICIDES REMOVAL FROM WATER USING MODIFIED POLY(DIVINYLBENZENE)

---

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę usuwania herbicydów z roztworów wodnych w wyniku adsorpcji na polidivinylobenzenie zmodyfikowanym w reakcji cykloaddycji Dielsa–Aldera. Zastosowane zostały adsorbenty różniące się wielkością powierzchni właściwej oraz zawartością grup umożliwiających sorpcję specyficzną, dzięki czemu określony został wpływ oddziaływań pomiędzy adsorbentem a adsorbentem na wydajność procesu.

*Słowa kluczowe: oczyszczanie wody, herbicydy, adsorpcja, adsorbenty polimerowe, polidivinylobenzen, reakcja Dielsa-Aldera*

#### Abstract

In the paper selective herbicides removal from water by adsorption using modified poly(divinylbenzene) was presented. Applied adsorbents were characterized by varied surface area and content of groups causing specific sorption. Due to that, impact of interactions between adsorbent and adsorbate on process efficiency was defined.

*Keywords: water treatment, herbicides, adsorption, polymer adsorbents, poly(divinylbenzene), Diels-Alder reaction*

---

\* Mgr inż. Małgorzata Kica, dr inż. Sylwia Ronka, Zakład Materiałów Polimerowych i Węglowych, Wydział Chemiczny, Politechnika Wroclawska.

### Oznaczenia

|              |  |
|--------------|--|
| $X_{kw}$     | – zawartość grup kwasowych, mmol/g   |
| $C_z$        | – stężenie zasady, mmol/ cm <sup>3</sup>   |
| $V_z$        | – objętość zasady, cm <sup>3</sup>   |
| $C_k$        | – stężenie kwasu, mmol/ cm <sup>3</sup> ,  |
| $V_k$        | – objętość kwasu, cm <sup>3</sup> ,  |
| $m_m$        | – masa spęcznionego polimeru, g  |
| % <i>zaw</i> | – zawartość polimeru w spęcznionym żelu, %   |
| $C_0$        | – początkowe stężenie adsorbentu, mg/dm <sup>3</sup>   |
| $C_R$        | – równowagowe stężenie adsorbentu, mg/dm <sup>3</sup>  |
| $V$          | – objętość dodanego roztworu adsorbentu, dm <sup>3</sup>   |
| $m$          | – masa suchego polimeru, g   |
| $\alpha$     | – współczynnik podziału  |
| $S$          | – wielkość sorpcji, czyli ilość zaadsorbowanego herbicydu w przeliczeniu na masę sorbentu, mg/g              |
| $S_{max}$    | – maksymalna sorpcja, czyli największa ilość zaadsorbowanego herbicydu w przeliczeniu na masę sorbentu, mg/g |
| $\rho$       | – gęstość rozpuszczalnika, g/dm <sup>3</sup>   |
| $C_R$        | – równowagowe stężenie adsorbentu, mg/dm <sup>3</sup>  |

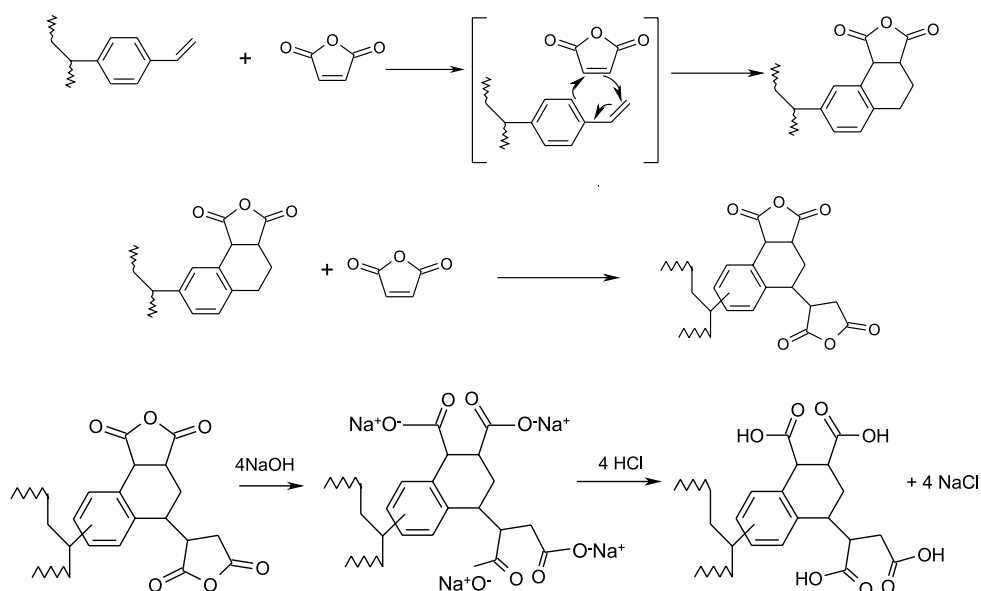
## 1. Wstęp

Ze względu na powszechność zastosowania, trwałość w środowisku oraz toksyczność usuwanie herbicydów z wody jest istotnym zagadnieniem ekologicznym. Ma to odzwierciedlenie w zainteresowaniu tą tematyką licznych grup badawczych oraz w znacznej liczbie publikacji wydawanych na przełomie ostatnich lat [1, 2]. Jednym z najpopularniejszych i najefektywniejszych sposobów usuwania toksyn i zanieczyszczeń z roztworów wodnych jest adsorpcja, zaś ze względu na znaczną powierzchnię właściwą, łatwą regenerację oraz prostotę modyfikacji znacznym zainteresowaniem cieszą się adsorbenty polimerowe. W ostatnim czasie wzrosło szczególnie zainteresowanie specyficznymi adsorbentami służącymi do usuwania z roztworów wodnych wybranych substancji. Efektywnym sposobem na otrzymanie specyficznych adsorbentów polimerowych ukierunkowanych na usuwanie wybranych zanieczyszczeń z wody jest modyfikacja chemiczna. W wyniku wprowadzenia grup funkcyjnych w strukturę polimeru, możliwe jest wytworzenie specyficznych oddziaływań pomiędzy cząsteczkami adsorbentu i adsorbentu, a tym samym intensyfikacja sorpcji. Przykładem jest wprowadzenie grup karboksylowych implikujące specyficzne oddziaływania pomiędzy cząsteczkami zmodyfikowanego polistyrenu a p-nitroaniliną [3] czy grup sulfonowych, mających na celu usunięcie acetaminofenu [4]. W poniższej pracy przedstawione zostało selektywne usuwanie atrazyny z roztworów wodnych przy użyciu polidivinylobenzenu zmodyfikowanego w wyniku reakcji Diesla–Aldera.

## 2. Część eksperymentalna

### 2.1. Synteza i charakterystyka adsorbentów

Polidiwinylbenzen użyty do dalszej modyfikacji zsyntetyzowano, stosując polimeryzację suspensyjną. Jako inicjator zastosowany został nadtlenek benzoilu, rolę stabilizatora suspensji pełnił poli(alkohol winylowy). Strukturę porowatą polimerów projektowano przez zastosowanie mieszaniny rozpuszczalników o różnych zawartościach heptanu i toluenu. Kolejnym etapem syntezy adsorbentów była modyfikacja otrzymanych polimerów za pomocą bezwodnika maleinowego, a następnie zasadowa hydroliza z użyciem wodorotlenku sodu. Schemat reakcji został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Modyfikacja polidivinylobenzenu za pomocą bezwodnika maleinowego [5]

Fig. 1. Modification of polydivinylbenzene with maleic anhydride [5]

Modyfikacja prowadzona była w toluenie, w temperaturze wrzenia rozpuszczalnika. Czas trwania modyfikacji wynosił 48 godzin. W wyniku reakcji otrzymano zmodyfikowany polidivinylobenzen zawierający w strukturze grupy karboksylowe. Zawartość grup kwasowych oznaczono w wyniku odwrotnego miareczkowania kwasem solnym i obliczano ze wzoru:

$$X_{kw} = \frac{C_z \cdot V_z - C_k \cdot V_k}{m_m \cdot \%zaw} \quad (1)$$

Aby otrzymać pełną charakterystykę sorbentów i zdolność sorpcji niespecyficzną, przeprowadzono badania ich struktury porowatej. Wielkość powierzchni właściwej otrzymanych polimerów porowatych określono na podstawie adsorpcji azotu w temperaturze ciekłego

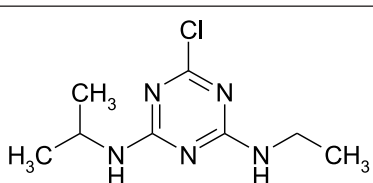
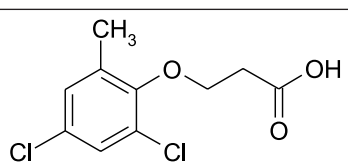
azotu za pomocą aparatu Micromeritics ASAP 2020. Zbadano także wielkość i objętość porów. Interpretację wyników oparto o teorię wielowarstwowej adsorpcji Brunauera, Emmeta i Tellera (BET).

## 2.2. Badania sorpcyjne

Analizowane herbicydy pochodzą z Instytutu Przemysłu Organicznego znajdującego się w Warszawie. Ich ogólna charakterystyka przedstawiona została w tabeli 1.

Tabela 1

Charakterystyka stosowanych herbicydów

| Odczynnik                                   | Czystość<br>(+/- 0,1%) | Wzór chemiczny  |
|---|------------------------|---|
| Atrazyna                                    | 98,8%                  |   |
| Kwas 4,6-dichloro-2-metylofenoksypropionowy | 96,4%                  |  |

Metodą statyczną zbadano sorpcję dwóch herbicydów: atrazyny oraz kwasu 2,6-dichloro-2-metylofenoksypropionowego na uprzednio zsyntetyzowanych adsorbentach. Izotermy sorpcji sporządzono, stosując serię próbek badanego adsorbentu w formie spęcznionej w ilościach odpowiadających określonej masie suchego polimeru, zadając różne objętości roztworu herbicydu. Tak przygotowany układ umieszczano w wytrząsarce na okres 24 godzin. Po określonym czasie pobierano roztwór z nad polimeru i mierzono spektrofotometrycznie jego absorbancję przy określonej długości fali. Stężenie zabsorbowanych herbicydów obliczano na podstawie uprzednio sporządzonych krzywych wzorcowych. Ilość zaadsorbowanego herbicydu na badanych sorbentach obliczono, posługując się metodą różnicową wg następującego wzoru:

$$S = \frac{(C_0 - C_R) \cdot V}{m} \quad (2)$$

Współczynnik podziału adsorbowanej substancji pomiędzy sorbentem a roztworem dla maksymalnej wartości sorpcji wyznaczono ze wzoru:

$$\alpha = \frac{S_{\max} \cdot \rho}{C_r} \quad (3)$$

W celu zbadania kinetyki sorpcji dla układów adsorbent–atrazyna przygotowano naważkę spęcznionego polimeru, zadano ją roztworem atrazyny o stężeniu 10 ppm. Kolbę umieszczono w wytrząsarce. W celu wykreślenia kinetyki sorpcji z przygotowanych próbek pobierano roztwór adsorbentu z nad polimeru, w określonych odstępach czasowych, aż do ustalenia się stanu równowagi.

### 3. Omówienie wyników

#### 3.1. Charakterystyka adsorbentów

Zsyntetyzowane adsorbenty scharakteryzowano zarówno pod kątem zawartości grup kwasowych umożliwiających selektywną sorpcję, jak i wyznaczono ich powierzchnię właściwą i objętość porów. Adsorbentom przypisano następujące symbole: Z1, Z2, P1, P2, gdzie P oznacza adsorbent porowaty, natomiast Z polimer żelowy. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

#### Charakterystyka sorbentów

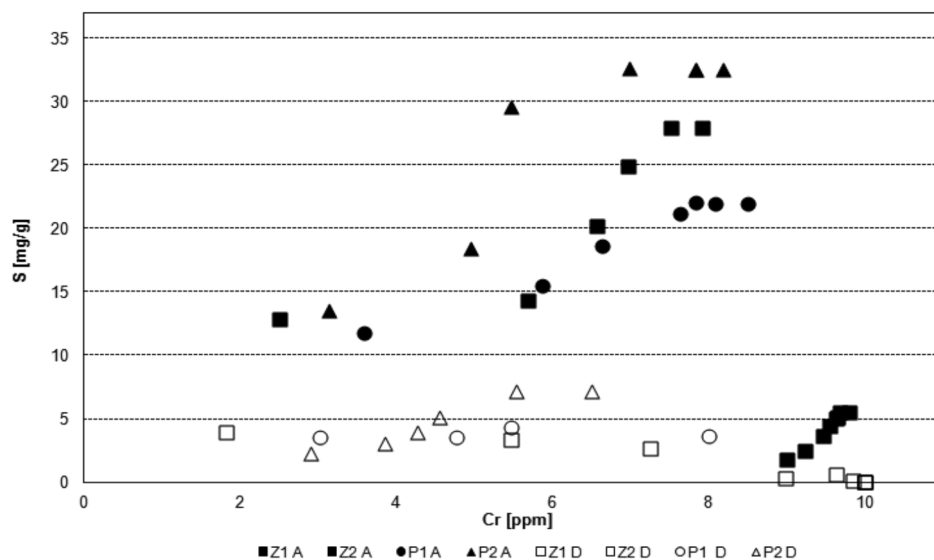
| Symbol sorbentu | Zawartość grup kwasowych [mmol/<br>g <sub>suchego polimeru</sub> ] | Powierzchnia właściwa [m <sup>2</sup> /g] | Średni rozmiar porów* [nm] | Średnia objętość porów* [cm <sup>3</sup> /g] |
|-----------------|--|---|----------------------------|--|
| Z1              | 2,6  | 479                                       | 2,80 (0,78)                | 0,33 (0,13)                                  |
| Z2              | 2,3  | –   | –                          | –  |
| P1              | 2,8  | 517                                       | 8,98 (0,80)                | 1,16 (0,15)                                  |
| P2              | 1,8  | 737                                       | 6,96 (0,81)                | 1,28 (0,17)                                  |

\*w nawiasie podano średni rozmiar i objętość mikroporów.

#### 3.2. Badania sorpcyjne

W celu określenia wpływu budowy adsorbentu na sorpcję atrazyny oraz kwasu 4,6-dichloro-2-metylofenoksypropionowego przeprowadzono badania sorpcji statycznej. W celu uzyskania izoterm sorpcji przeprowadzono serię pomiarów dla danego adsorbentu przy wykorzystaniu różnych objętości sorbatu. Z otrzymanych wyników pomiarów wykreślono zależności wielkości sorpcji (S) od stężenia równowagowego adsorbentu (Cr), które przedstawiono na rysunku 2.

Zgodnie z klasyfikacją typów izoterm adsorpcji zalecaną przez IUPAC analizowane układy atrazyna-adsorbent należą do izoterm typu IV. Jest to rozposzechniony, charakterystyczny dla adsorbentów mezoporowatych typ izoterm. W przypadku kwasu 2,4-dichloro-2-metylofenoksypropionowego możliwe jest określenie typu izoterm wyłącznie w układzie z adsorbentem P2. Również w tej sytuacji kształt wskazuje na izotermę typu IV. Na podstawie przebiegu krzywych wyznaczono maksymalną wielkość sorpcji oraz obliczono współczynnik podziału herbicydów pomiędzy adsorbent, a roztwór adsorbentu. Wyniki przedstawiono w tabeli 3.



Rys. 2. Izotermi sorpcji dla badanych układów adsorbent–herbicyd

Fig. 2. Sorption isotherms for analyzed herbicides and adsorbents

Tabela 3

**Wartość maksymalnej sorpcji oraz współczynnika podziału herbicydów przez badane adsorbenty**

| Adsorbat                                    | Adsorbent | $S_{\max}$<br>[mg/g] | $\alpha$<br>[-] |
|---|-----------|----------------------|-----------------|
| Atrazyna                                    | Z1        | 28,02                | 3720            |
|   | Z2        | 5,48                 | 570             |
|   | P1        | 22,05                | 2820            |
|   | P2        | 32,63                | 4670            |
| Kwas 2,4-dichloro-2-metylofenoksypropionowy | Z1        | 3,95                 | 2180            |
|   | Z2        | 0,33                 | 20              |
|   | P1        | 3,56                 | 1180            |
|   | P2        | 7,22                 | 1300            |

Z otrzymanych wyników widać, iż sorpcja atrazyny w przypadku wszystkich adsorbentów jest znacząco większa niż sorpcja kwasu 2,4-dichloro-2-metylofenoksypropionowego. Wynika to ze struktury obydwu herbicydów, a także komplementarności budowy atrazyny oraz zsyntetyzowanych adsorbentów. Wartość sorpcji jest najwyższa dla polimeru P2, co wynika z najbardziej rozwiniętej powierzchni właściwej ze wszystkich badanych adsorbentów. Z tej samej przyczyny najniższą sorpcją charakteryzuje się adsorbent Z2 – nie wykazuje on struktury porowatej, sorpcja wynika wyłącznie z wytworzenia specyficznych oddziaływań

z cząsteczkami herbicydów. Dlatego też praktycznie nie zaobserwowano sorpcji w układzie tego adsorbentu i kwasu 2,4-dichloro-2-metylofenoksypropionowego. Zwiększona sorpcja na adsorbencie Z1 w stosunku do P1, charakteryzującego się większą powierzchnią właściwą może wynikać ze średniego rozmiaru porów adsorbentów. W przypadku polimeru Z1 struktura porowata wynika z obecności porów o średnim rozmiarze 2,8 nm, co może powodować skuteczniejsze zatrzymywanie cząsteczek atrazyny niż przez ponad dwukrotnie większe pory adsorbentu P1.

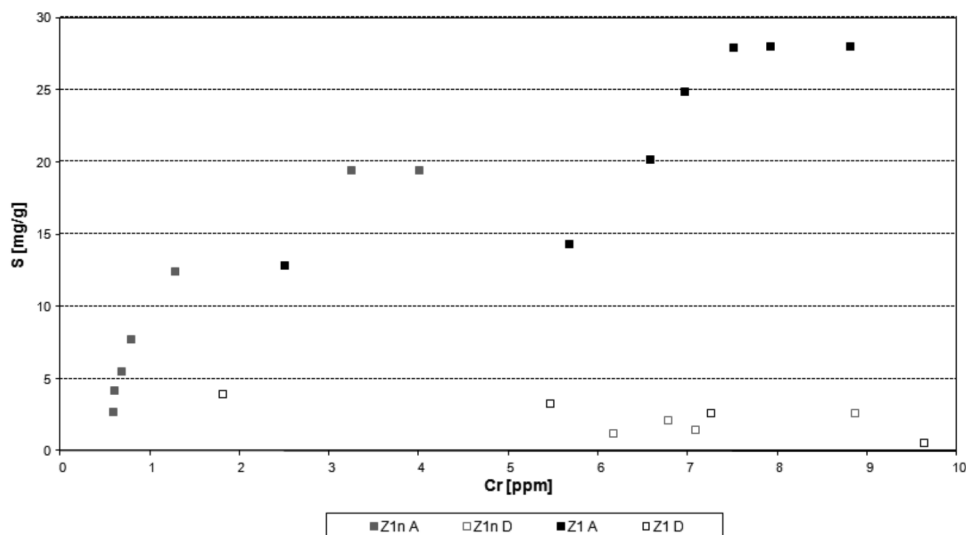
Obliczone współczynniki podziału atrazyny dla adsorbentów Z1, P1 oraz P2 świadczą o skutecznym usuwaniu jej z roztworów wodnych. Współczynnik ten w przypadku adsorbentu Z2 jest znacznie niższy, co jest spowodowane kilkakrotnie niższą wartością sorpcji. Współczynniki podziału charakteryzujące układy adsorbentów z kwasem 2,4-dichloro-2-metylofenoksypropionowym przyjmują niższe wartości, co wynika z braku komplementarności budowy, a tym samym niższego poziomu sorpcji związanego wyłącznie z zatrzymaniem herbicydu w porach.

Udział sorpcji specyficznej określano również w oparciu o wyniki badania sorpcji na adsorbentach Z1 oraz Z2 przed modyfikacją (Z1n, Z2n). Otrzymane wyniki porównano z wartościami sorpcji dla polimerów zmodyfikowanych. W przypadku adsorbentu Z2n, nie zaobserwowano sorpcji. Stężenia herbicydów mimo dodatku adsorbentu nie uległy zmianie. W układach zawierających adsorbent Z1n następowała sorpcja, zarówno atrazyny, jak i kwasu 4,6-dichloro-2-metylofenoksypropionowego. Wielkość sorpcji atrazyny na polimerze przed modyfikacją widocznie zmalała, w porównaniu do sorbentu zawierającego w strukturze grupy karboksylowe. Porównanie wielkości sorpcji herbicydów dla adsorbentów przed (Z1n, Z2n) i po modyfikacji (Z1, Z2) zebrano w tabeli 4. Izotermy sorpcji przedstawiono na rysunku 3.

Tabela 4

**Porównanie wartości sorpcji herbicydów (S) przez adsorbenty przed (Z1n, Z2n) i po modyfikacji (Z1, Z2)**

| Adsorbat                                    | Adsorbent | S<br>[mg/g] |
|---|-----------|-------------|
| Atrazyna                                    | Z1n       | 19,50       |
|   | Z1        | 28,02       |
|   | Z2n       | 0           |
|   | Z2        | 5,48        |
| Kwas 2,4-dichloro-2-metylofenoksypropionowy | Z1n       | 2,63        |
|   | Z1        | 3,95        |
|   | Z2n       | 0           |
|   | Z2        | 0,33        |



Rys. 3. Izotermy sorpcji atrazyny (A) i kwasu 4,6-dichloro-2-metylofenoksypropionowego (D) na zmodyfikowanym adsorbencie (Z1) oraz na adsorbencie przed modyfikacją (Z1n)

Fig. 3. Sorption isotherms for atrazine (A) 4,6-dichloro-2-methylphenoxypropionic acid (D) on adsorbent before (Z1n) and after modification (Z1)

Na podstawie otrzymanych wyników widoczny jest wpływ specyficznych oddziaływań na wielkość sorpcji. W przypadku adsorbentu Z1 poprzez wprowadzenie w strukturę grup karboksylowych wielkość sorpcji znacząco wzrasta. Sorpcja na polimerze przed modyfikacją jest możliwa dzięki zatrzymywaniu cząsteczek atrazyny przez pory sorbentu, zaś w wyniku wytworzenia specyficznych oddziaływań następuje intensyfikacja sorpcji o 8,5 mg/g. Udział sorpcji specyficznej potwierdza fakt, że jest to wartość zbliżona do wielkości sorpcji na zmodyfikowanym polimerze Z2, na którym sorpcja możliwa jest wyłącznie w wyniku wytworzenia wiązań wodorowych z cząsteczkami adsorbentu. Różnice w wielkości sorpcji specyficznej wynikają z niewielkich różnic w zawartości grup kwasowych w adsorbentach Z1 oraz Z2.

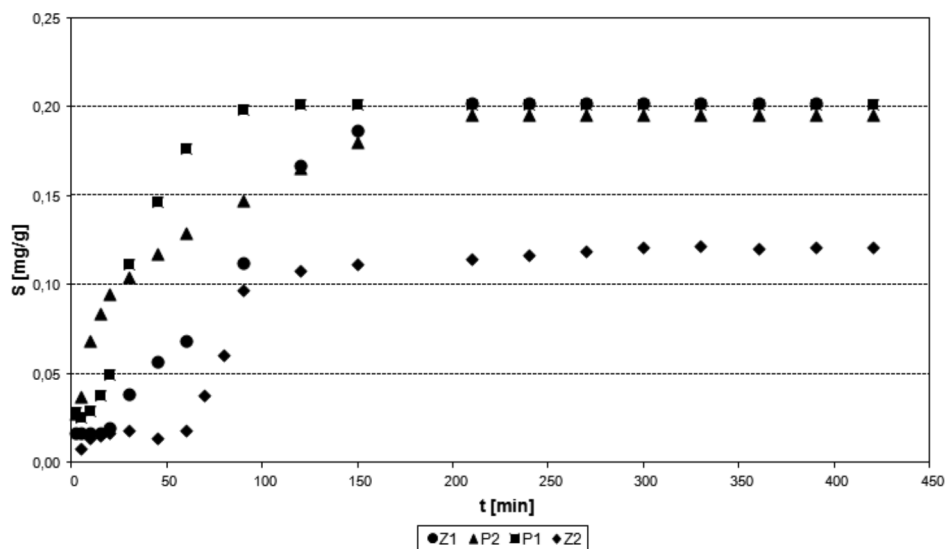
Analizę kinetyki sorpcji przeprowadzono w oparciu o pomiary absorbancji roztworu znajdującego się nad adsorbentem, wykonywanych w określonych odstępach czasowych. Z tak otrzymanych danych wykreślono krzywe zależności sorpcji od czasu. Na rysunku 4 przedstawiona jest kinetyka sorpcji z roztworu atrazyny o stężeniu początkowym 1 ppm.

W przypadku czterech przedstawionych zależności widoczne są różnice pomiędzy sorpcją atrazyny na poszczególnych sorbentach. Z otrzymanych wykresów odczytano wartość równowagową sorpcji ( $S_p$ ) oraz czas po jakim została osiągnięta ( $t_p$ ). Wyniki umieszczono w tabeli 5.

Czas ustalenia się równowagi sorpcji w znacznej mierze zależy od budowy analizowanego adsorbentu. W przypadku adsorbentu Z2 równowaga została osiągnięta w krótkim czasie (120 min) ze względu na dostępność grup kwasowych, usytuowanych na powierzchni polimeru. Adsorbent ten nie wykazuje porowatości, co sprawia, że nie występuje konieczność wnikania cząsteczek adsorbentu do porów sorbentu. Tym samym możliwe jest szybkie wytworzenie specyficznych oddziaływań pomiędzy centrami aktywnymi a cząsteczkami atrazyny. Czas, po którym osiągnięta jest równowaga dla polimeru P1, jest taki sam jak w przypadku Z2, jednak przyczyna jest zupełnie inna. Adsorbent P1 charakteryzuje się największym śred-



nim rozmiarem oraz objętością porów, spośród analizowanych sorbentów. Powoduje to, że dyfuzja cząsteczek atrazyny w pory sorbentu jest szybka, a tym samym sorpcja zachodzi w krótszym czasie. Osiągnięcie wartości sorpcji równowagowej w przypadku adsorbentów P2 i Z1 następuje po czasie dłuższym niż w przypadku P1 i Z2. Średni rozmiar porów w przypadku adsorbentu Z1 jest około 3-krotnie mniejszy niż w P1. Powoduje to wydłużenie czasu dyfuzji atrazyny do wnętrza sorbentu. Ze względu na rozmiar porów adsorbentu P2 mniejszy niż w przypadku polimeru P1 osiągnięcie stanu równowagi trwa dłużej. Wartość sorpcji równowagowej dla polimerów P1, P2 oraz Z1 jest jednakowa i wynosi 0,20 mg/g. Jest to wartość równoważna z całkowitym zatrzymaniem atrazyny na powierzchni adsorbentu. Wartość sorpcji na adsorbencie Z2 wynosi 0,12 mg/g, co stanowi 60% wprowadzonej ilości atrazyny. Różnica w wielkości sorpcji w przypadku analizowanych adsorbentów wynika z wiązaniem atrazyny za pomocą oddziaływań niespecyficznych, za które odpowiada rozwinięta powierzchnia właściwa polimerów porowatych.



Rys. 4. Kinetyka sorpcji atrazyny na badanych adsorbentach

Fig. 4. Kinetic sorption of atrazine on analyzed adsorbents

Tabela 5

**Wartości równowagowej sorpcji oraz czas, po którym została osiągnięta w przypadku poszczególnych sorbentów**

| Adsorbent | $S_r$ [mg/g] | $t_r$ [min] |
|-----------|--------------|-------------|
| Z1        | 0,20         | 210         |
| Z2        | 0,12         | 120         |
| P1        | 0,20         | 120         |
| P2        | 0,20         | 210         |

#### 4. Wnioski

Modyfikacja polidwinylobenzenu bezwodnikiem maleinowym w reakcji Diesla-Alde-  
ra oraz zasadowa hydroliza prowadzi do wprowadzenia grup karboksylowych w strukturę  
adsorbentu, umożliwiając wytworzenie specyficznych oddziaływań z cząsteczkami adsor-  
batu. Potwierdzono intensyfikację sorpcji atrazyny na badanych adsorbentach wynikającą  
z komplementarności budowy zmodyfikowanego polidwinylobenzenu i adsorbentu. Zwięk-  
szenie wielkości sorpcji jest spowodowane tworzeniem się wiązań wodorowych pomiędzy  
sorbentem i sorbentem. Analizowane układy atrazyna–adsorbent należą do izoterm typu IV,  
charakterystycznego dla adsorbentów mezoporowatych.

Zmodyfikowany w opisany sposób polidwinylobenzen, charakteryzujący się odpowied-  
nimi własnościami fizykochemicznymi mógłby znaleźć zastosowanie jako specyficzny sor-  
bent o szerokim zakresie potencjalnych zastosowań, na przykład w oczyszczaniu wody czy  
artykułów spożywczych z herbicydów.

#### Literatura

- [1] Trochimeczuk A.W., Streat M., Malik D.J., *Sorption of Pesticides and Herbicides on Highly Polar Polymeric Sorbents*, Separation Science and Technology, 38, 2003, 1813-1827.
- [2] Kyriakopoulos G. et al., *Adsorption of pesticides on porous polymeric adsorbents*, Chemical Engineering Science 60, 2005, 1177-1186.
- [3] Zheng K., Pan B.C., Zhang Q.J., Zhang W.M., Pan B.J., Han Y.H., Zhang Q.R., Du W., Xu Z.W., Zhang Q.X., *Enhanced adsorption of p-nitroaniline from water by a carboxylated polymeric adsorbent*, Sep. Purif. Technol. 57, 2007, 250-256.
- [4] Li A.M., Cai J.G., Zhang H.Y., Ge J.J., Li Z.B., Long C., Liu F.Q., Zhang Q.X., Chinese patent: CN 1712365A, 2005.
- [5] Mercier A., Deleuze H., Mondain-Monval O., *Preparation and functionalization of (vinyl)polystyrene polyHIPE. Short routes to binding functional groups through a dimethylene spacer*, Reactive & Functional Polymers 46, 2000, 67-79.

AUGUSTYN KRZYSZTOF LORENC\*

## REGULACJE PRAWNE DOTYCZĄCE ZABEZPIECZENIA POJAZDÓW SZYNOWYCH W POLSKICH PRZEPRAWACH PROMOWYCH

### SECURITY REGULATIONS FOR RAILWAY VEHICLES ON POLISH FERRIES

#### Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono zestawienie obowiązujących przepisów dotyczących zabezpieczenia pojazdów szynowych w czasie przepraw promowych pomiędzy Polską a Szwecją. Obecnie nie ma ujednoliconych przepisów warunkujących tego typu przewozy, są one jednak regulowane przez wiele dokumentów, przy czym najbardziej kompletne wytyczne można znaleźć w CSS CODE opublikowanym przez IMO (International Maritime Organization). Obecnie trwają także prace nad ujednoczeniem przepisów „Guidelines for Packing of Cargo Transport Units (CTUs)” przez IMO, ILO, UNECE, których aktualna wersja weszła w życie w 1997 roku. Przepisy określają wymagania co do składowania i oprzyrządowania zabezpieczającego ładunek, a dokładniej odnoszą się do wartości sił powstających od przyspieszeń, przechyłów statku i masy ładunku oraz jego mocowania. Przestrzeganie tych przepisów i zaleceń pozwala na bezpieczny transport ładunków z wykorzystaniem przepraw promowych.

*Słowa kluczowe: przeprawy promowe, zabezpieczenie ładunku na promach, promowy przewóz wagonów, regulacje prawne*

#### Abstract

In this paper is present a summary of existing security legislation to ferry rail vehicles during between the Polish and Sweden. There are currently no clear rules determining this type of transportation, however, they are regulated by a number of documents with the most complete rules can be found in CSS CODE published by IMO (International Maritime Organization). Work is currently underway to harmonize the rules „Guidelines for Packing of Cargo Transport Units (CTUs)” by IMO, ILO, UNECE, they the current version was implemented in 1997.

Regulations specify requirements for storage and cargo security equipment, and more specifically refers to the forces resulting from acceleration, ships tilts and weight of the load and its securing. Observance of these rules and recommendations allows for safe transport of cargo with the use of ferries.

*Keywords: ferries, cargo security on ferries, ferry transport wagons regulations*

\* Mgr inż. Augustyn Krzysztof Lorenc, Instytut Pojazdów Szynowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Kolejowe przeprawy promowe są alternatywnym do przewozów kontenerowych sposobem przewożenia ładunków. Zarówno transport kontenerowy, jak i kolejowe przeprawy promowe pozwalają na przewóz bez konieczności zmiany rodzaju nośnika, na/w którym znajduje się towar począwszy od chwili jego załadowania, aż do wyładowania. Mimo że transport kontenerowy daje większe możliwości ze względu na możliwość integracji z transportem drogowym oraz dostarczanie ładunków w relacji *door-to-door*, to nie pozwala na przewóz ładunków wielkogabarytowych. Jest to natomiast możliwe dzięki wykorzystaniu wagonów kolejowych. Zabezpieczenie ładunków w obu przypadkach może odbywać się w podobny sposób, ponieważ istnieją zarówno kontenery, jak i wagony o zbliżonych parametrach, np. chłodnie, do przewozu cieczy i gazu, do przewozu materiałów sypkich oraz o konstrukcji zamkniętej i otwartej.

Polska uczestniczy w kolejowych bałtyckich przeprawach promowych umożliwiających przewóz towarów tylko i wyłącznie do Szwecji. Na terenie kraju znajdują się trzy porty morskie oferujące przeprawy promowe: Świnoujście, Gdynia oraz Gdańsk. Wszystkie umożliwiają przeprawy ludzi oraz samochodów jednak kolejowe przeprawy promowe są realizowane tylko z portu w Świnoujściu. Są one wykonywane w relacjach:

- Świnoujście (Polska)–Ystad (Szwecja),
- Świnoujście (Polska)–Trelleborg (Szwecja).

Wskazane połączenia zostały zaprezentowane na rys. 1.



Rys. 1. Kolejowe przeprawy promowe w Polsce

Fig. 1. Railway ferries in Poland

Kolejowe przeprawy promowe pomiędzy Polską a Szwecją są obsługiwane przez cztery statki:

- **Jan Śniadecki** – prom przeznaczony do transportu wagonów kolejowych oraz samochodów ciężarowych. Dwa pokłady o łącznej długości użytecznej linii torów kolejowych równej 600 metrów pozwalają pomieścić około 30 wagonów oraz w zależności od liczby wagonów od 25 do 60 zestawów drogowych;
- **Kopernik** – prom przeznaczony jest do przewozu wagonów kolejowych i posiada 600 metrów efektywnej linii torów kolejowych oraz pozwala na przewóz do 60 samochodów ciężarowych na dwóch pokładach ładunkowych;
- **Polonia** – prom Polonia może pomieścić na pokładzie do 1000 osób, 150 samochodów osobowych oraz do 120 samochodów ciężarowych lub opcjonalnie wagony kolejowe na torach o łącznej długości 600 metrów;

- **Wolin** – najdłuższy prom pływający na trasie Świnoujście–Trelleborg. Posiada dwa pokłady ładunkowe i może jednorazowo przewieźć do 90 zestawów drogowych oraz 50 samochodów osobowych. Jeden z pokładów przystosowany jest także do przewozu wagonów kolejowych i posiada 715 metrów bieżących torów kolejowych.

Zestawienie promów kolejowych kursujących pomiędzy Polską a Szwecją zostało zaprezentowane w tabeli 1.

Tabela 1

### Promy do przewozu wagonów kolejowych kursujące na morzu bałtyckim [7]

| Nazwa statku                         | Jan Śniadecki              | Kopernik                 | Polonia                  | Wolin                    |
|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Port macierzysty, kraj bandery       | Limassol, Cypr             | Szczecin, Polska         | Nassau, Bahama           | Nassau, Bahama           |
| Znak rozpoznawczy                    | P3TXG                      | SPS 2643                 | C6NC7                    | C6WN4                    |
| Długość                              | 155,1 m                    | 160,07 m                 | 169,9 m                  | 188,9 m                  |
| Szerokość                            | 21,6 m                     | 21,60 m                  | 28 m                     | 23,1 m                   |
| Prędkość max                         | 19 węzłów                  | 18 węzłów                | 20,2 węzła               | 18 węzłów                |
| Wielkość GT                          | 14 417                     | 14 221                   | 29 875                   | 22 874                   |
| Miejsc pasażerskich                  | 57                         | 360                      | 918                      | 370                      |
| Długość linii kolejowych ładunkowych | 590,5 m<br>(pokład główny) | 600 m<br>(pokład główny) | 604 m<br>(pokład główny) | 715 m<br>(pokład główny) |
| Linia                                | Świnoujście–Ystad          | Świnoujście–Ystad        | Świnoujście–Ystad        | Świnoujście–Trelleborg   |

## 2. Warunki przewozu wagonów i lokomotyw w relacjach Polska–Szwecja

Warunki dla wagonów przewożonych promami na linii Świnoujście–Ystad, dla [7]:

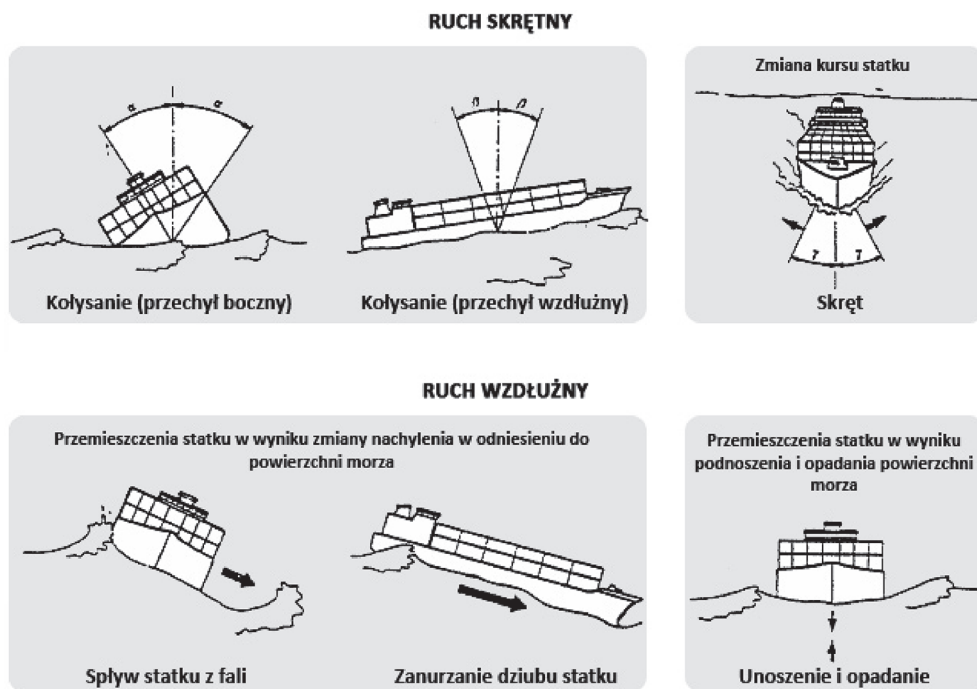
- wagonów dwuosioowych: bez ograniczeń;
- wagonów trzyosioowych: wagony trzyosiowe mogą być przewożone jedynie przy korzystnym stanie wód. Muszą one mieć możliwość pokonywania łuków torów na promach;
- wagony na wózkach przystosowane do transportu promami bez ograniczeń: wagony na wózkach dwu- lub trzyosioowych są dopuszczone do przewozu bez ograniczeń, jeżeli mogą one jednocześnie pokonywać największy kąt pochylenia mostków przejściowych i łuki torów na promach;
- pozostałe wagony na wózkach i ładunki załadowane na więcej niż jednym wagonie lub ładunki z użyciem wagonu ochronnego: wagony na wózkach dwu- lub trzyosioowych, które nie odpowiadają wyżej wymienionym warunkom, wagony na wózkach więcej niż trzyosioowych, jak również przesyłki załadowane na więcej niż jednym wagonie (przesyłki na wagonach trwale sprzęgniętych lub przy użyciu wagonów ochronnych) mogą być przekazywane wyłącznie na podstawie uprzednio zawartego porozumienia i przy korzystnym stanie wód.

### 3. Wpływ warunków pogodowych oraz oddziaływanie fal na statek

Transport morski jest wykonywany w różnorodnych warunkach pogodowych, które mogą powodować powstawanie złożonych sił oddziaływujących przez długi okres czasu na statek oraz znajdujące się na nim ładunki. Na statek zawsze oddziałują siły liniowe oraz siły skrętne, przy czym siły skrętne stanowią większe zagrożenie dla przewożonych ładunków. Siły mogą powstawać w wyniku:

- zanurzania się dziobu statku,
- przechyłu bocznego i wzdłużnego,
- unoszenia się i opadania pod wpływem oddziaływania fal,
- skrętu statku,
- kołysania i spływu statku z fali.

Ponadto wymienione siły mogą się wzajemnie łączyć jako dwie lub więcej składowych. Zachowanie się statku pod wpływem oddziaływania fal zaprezentowano na rys. 2 [3].



Rys. 2. Zachowanie się statku pod wpływem oddziaływania fal

Fig. 2. The behavior of a vessel under the influence of waves

#### 4. Regulacje dotyczące składowania i zabezpieczenia przewozu wagonów

Zabezpieczenie ładunków w przewozach morskich jest znacznie bardziej złożone niż zabezpieczenie ładunków w transporcie drogowym z uwagi na większe ryzyko przemieszczania się ładunku spowodowane oddziaływaniem morza na statek. Sposoby odpowiedniego zabezpieczenia ładunków są regulowane przez międzynarodowe dokumenty oraz konwencje:

- Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing (CSS CODE 2011), International Maritime Organization,
- IMO/ILO/UNECE Guidelines for Packing of Cargo Transport Units (CTUs),
- Międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu, 1974 SOLAS,
- AVV – General Agreement on Use of Wagons.

Ponadto każdy statek może posiadać własny dokument określający zasady składowania i zabezpieczenia transportowanych ładunków, tzw. Cargo Securing Manual, który jest opracowywany w większości zgodnie z wytycznymi IMO – Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing [2]. W Cargo Securing Manual znajdują się między innymi informacje na temat statku i ładowni oraz możliwościach składowania i zasadach zabezpieczenia ładunku. Można w nim znaleźć takie dane, jak:

- informacje podstawowe i szczegółowe na temat statku,
- wyjaśnienia pojęć i terminów,
- dokładne wymiary wszystkich ładowni,
- nośność pokładów,
- informacje o możliwościach występowania sił oddziałujących na ładunki,
- współczynniki bezpieczeństwa,
- informacje o dopuszczalnych przyśpieszeniach ładunku dla danego miejsca składowania,
- sposoby obliczenia minimalnej wytrzymałości oprzyrządowania zabezpieczającego ładunków,
- możliwości mocowania ładunku oraz jego zabezpieczenia,
- sposoby składowania ładunków niestandardowych oraz niebezpiecznych.

#### 5. Podstawowe założenia dotyczące zabezpieczenia ładunków na statkach

Załadunek oraz zabezpieczanie przewożonych towarów powinno być odpowiednio przeprowadzone z uwzględnieniem wszystkich właściwości danego ładunku. Nigdy nie należy zakładać, że podczas kursu pogoda będzie dobra, a morze spokojne, ponieważ przy długich trasach i długim czasie przewozu warunki pogodowe (temperatura, wilgotność, itd.) mogą ulec zmianie i znacznie odbiegać od panujących w chwili wypłynięcia z portu. Warunki pogodowe mogą mieć wpływ na warunki wewnętrzne jednostki ładunkowej, które mogą być przyczyną skraplania się wody na powierzchni ładunku (pocenie się) lub powierzchniach wewnętrznych jednostki ładunkowej. Należy także zwrócić uwagę na fakt, że metody zabezpieczeń stosowane w transporcie lądowym nie zawsze będą odpowiednie dla transportu marsekiego.

W przewozach morskich, tak samo jak w transporcie kolejowym, mogą występować wstrząsy i wibracje ładunku, istotne jest zatem zabezpieczenie ładunków znajdujących się na transportowanych wagonach. W tabeli 2 przedstawiono wartości maksymalnych przyśpieszeń mogących powstawać w czasie transportu ładunków przy określonym typie przewozu.

**Maksymalne dopuszczalne przyspieszenia dla transportu morskiego [3, 5]**

| Przyspieszenie<br>Strefa morska | Do przodu | Do tyłu | Na boki | Wzdłużne<br>minimalne<br>pionowo w dół | Poprzeczne<br>minimalne<br>pionowo w dół |
|---------------------------------|-----------|---------|---------|--|--|
| Morze Bałtyckie                 | 0,3±0,5   | 0,3±0,5 | 0,5     | 0,5                                    | 1,0                                      |
| Morze Północne                  | 0,3±0,7   | 0,3±0,7 | 0,7     | 0,3                                    | 1,0                                      |
| Bez ograniczeń                  | 0,4±0,8   | 0,4±0,8 | 0,8     | 0,2                                    | 1,0                                      |

Przy planowaniu rozmieszczenia ciężkich ładunków niezbędne jest uzyskanie takiego rozkładu przyspieszeń, aby zapewnić występowanie:

- najmniejszych przyspieszeń w sekcjach śródkręcia oraz pod pokładem,
- największych przyspieszeń w sekcjach śródkręcia oraz na pokładzie.

Ciężkie ładunki powinny być usytuowane przodem ładunku do rufy statku. Masa ładunków powinna być tak rozmieszczona na statku, aby uniknąć nadmiernych naprężeń mogących powstać w strukturze statku. Szczególnie w przypadku ciężkich ładunków składowanych na pokładzie niezbędne jest zastosowanie – adekwatnie do występujących sił – wsporników i belek drewnianych lub stalowych, które pozwolą na przenoszenie sił pochodzących od masy ładunku na strukturę statku. Jest to też szczególnie ważne w przypadku składowania ładunku na miejscach szczególnie podatnych na działanie obciążeń, takich jak np. włazy.

## 6. Zabezpieczenie pojazdów kołowych na pokładzie statku

Według wytycznych International Maritime Organization zawartych w CSS CODE pojazdy kołowe, takie jak lokomotywy, wagony oraz samochody, ciężarówki i ciągniki, powinny być przewożone tak, aby [2]:

- powierzchnia ładunkowa, na której będzie składowany pojazd była sucha, czysta, wolna od smarów oraz oleju;
- pojazdy kołowe były opatrzone odpowiednimi i wyraźnie oznaczonymi punktami mocowania pojazdu w trakcie transportu lub innymi odpowiednikami o wystarczającej wytrzymałości;
- pojazdy kołowe, które nie posiadają punktów pozwalających na mocowanie pojazdu w trakcie transportu powinny posiadać wyraźne oznaczenia miejsc, które mogą być wykorzystane do przymocowania ładunku;
- pojazdy kołowe, które nie posiadają gumowych kół lub pojazdy nie posiadające własnej podstawy zwiększającej tarcie powinny być zawsze być składowane na drewnianych stalunkach lub innych materiałach zwiększających tarcie takie jak miękkie deski, gumowe maty itd.;
- pojazd znajdujący się na docelowym miejscu składowania, jeśli posiada własne hamulce powinien mieć je zaciągnięte;



- pojazdy kołowe były umocowane do statku za pomocą odciągów o dostatecznej wytrzymałości oraz charakteryzujące się zdolnością do rozciągania co najmniej o podobnych parametrach do stalowych łańcuchów i lin;
- jeśli jest to możliwe, pojazdy kołowe, były składowane blisko burty lub tak rozmieszczone, aby zapewnić dostęp do punktów mocujących o odpowiedniej sile lub powinny być zablokowane po bokach powierzchni ładunku, aby zapobiec jego przemieszczeniom;
- zapobiec jakimkolwiek przesunięciom bocznym pojazdów kołowych nieposiadających własnych punktów mocowania. Tam gdzie jest to możliwe powinny być one składowane blisko burty oraz blisko siebie lub powinny być zablokowane przez inne ładunki, takie jak np. kontenery itp.;
- zapobiec przesunięciom pojazdów kołowych, tam gdzie jest to możliwe, powinny być one składowane przodem, a nie bokiem do burty. Jeżeli jest nieuniknione składowanie poprzeczne pojazdów kołowych to może być konieczne zastosowanie dodatkowych mocowań o odpowiednio większej wytrzymałości;
- koła pojazdów były zablokowane, aby zapobiec przesunięciom pojazdu;
- wszystkie ruchome i wystające elementy pojazdów, takie jak dźwigi, wysięgniki i maszty, powinny być odpowiednio zablokowane i zabezpieczone w określonej pozycji.

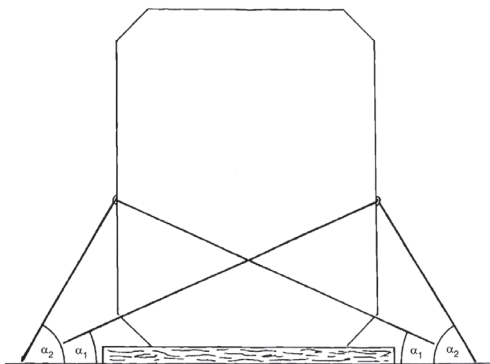
Międzynarodowa konwencja SOLAS określa rozmieszczenie i mocowanie ładunku według następujących zasad [4]:

- ładunki i jednostki ładunkowe przewożone na i pod pokładem powinny być załadowane, rozmieszczane i mocowane w taki sposób, aby zapobiec w trakcie rejsu statku uszkodzeniu lub wywołaniu niebezpieczeństwa dla statku i osób zajmujących się nim, a także utracie ładunku;
- towar przewożony jako jednostka ładunkowa powinien być załadowany i zabezpieczony jako pojedyncza jednostka na czas trwania rejsu w taki sposób, aby zapobiec uszkodzeniu lub wywołaniu niebezpieczeństwa dla statku i osób znajdujących się na nim;
- należy podjąć odpowiednie środki ostrożności podczas załadunku i przewozu ładunków ciężkich o nietypowych wymiarach, by nie nastąpiło uszkodzenie statku oraz aby była zachowana wystarczająca stateczność znajdujących się na pokładzie ładunków w trakcie rejsu;
- należy podjąć odpowiednie środki ostrożności podczas załadunku i przewozu jednostek ładunkowych na pokładach statków ro-ro ze szczególnym zwróceniem uwagi na osprzęt stały, znajdujący się na takich statkach i zaczepy na jednostkach ładunku oraz na wytrzymałość osprzętu stałego i przenośnego.

## **7. Zabezpieczenie ładunków przeciwko przesunięciom oraz przewróceniu**

Oprządkowanie zabezpieczające ładunek powinno być dobrane w taki sposób, aby wytrzymać poprzeczne i wzdłużne siły mogące przyczynić się do przesunięcia lub przewrócenia ładunków.

Optymalny kąt mocowania olinowania z uwagi na przesunięcie to około 25°, natomiast z uwagi na przewrócenie wynosi od 45° do 60° (rys. 3). Jeżeli występuje taka potrzeba, to olinowanie może być zamocowane pod mniejszym kątem, jednak w takim przypadku ładunek musi być dodatkowo zabezpieczony za pomocą drewnianych podpór, połączeń spawanych lub innych metod pozwalających na bezpieczny przewóz ładunków.

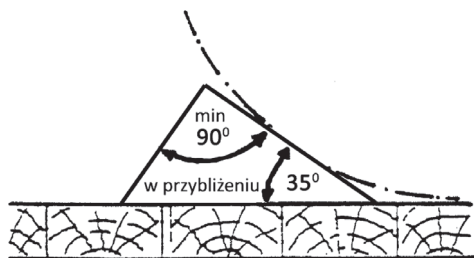


Rys. 3. Kąty mocowania olinowania dla ciężkich ładunków ze względu na przesunięcia ( $\alpha_1$ ) oraz przewrócenia ( $\alpha_2$ ) [2]

Fig. 3. Lashing angles for heavy loads due to the offset and tipping ( $\alpha_2$ )

Należy zwrócić szczególną uwagę uchwytów, zacisków oraz na ciasne wiązania pasów mocujących, które mogą spowodować przetarcie się mocowania. Wszystkie zabezpieczenia powinny być należycie sprawdzone. Tam, gdzie jest to konieczne, zastosowane rozwiązania zabezpieczenia ładunków powinny być zweryfikowane na podstawie odpowiednich przeliczeń (zgodnie z aneksem 13 do CSS CODE).

Nie można zakładać, że ładunki o dużej masie nie będą się przemieszczały podczas transportu. Ładunek oraz każdy jego element powinien być zabezpieczony w taki sposób, aby uniemożliwić mu samoczynne przemieszczenie się. Jest to szczególnie ważne zwłaszcza jeśli chodzi o ładunki walcowe oraz ładunki poruszające się na własnych kołach. Powinny być zabezpieczone odpowiednimi klinami (rys. 4).



Rys. 4. Blokowanie toczących się ładunków za pomocą klinów [3]

Fig. 4. Securing of rolling cargo with wedges

Przy operacjach zabezpieczania ładunków wykorzystywane są następujące pojęcia:

- **BL** (*Breaking Load*) – siła zrywająca – jest to nominalna (zakładana) siła, przy której dany element lub zestaw elementów ulegnie zerwaniu,
- **MSL** (*Maximum Securing Load*) – największa dopuszczalna siła, jaką można obciążyć dany element,
- **CS** (*Calculation Strength*) – dopuszczalne obciążenie robocze.

Dopuszczalne obciążenie robocze jest obliczane z następującego wzoru [2]:

$$CS = \frac{MSL}{\text{współczynnik bezpieczeństwa}} \quad (1)$$

gdzie:

współczynnik bezpieczeństwa: 1,5

Pomimo wprowadzenia współczynnika bezpieczeństwa, zawsze należy zachować ostrożność przy stosowaniu elementów zabezpieczających i dobrać je tak, aby były wykonane z tego samego materiału i były tej samej długości, dzięki czemu będzie zapewniona jednakość elastyczność wszystkich elementów w ramach całego układu.

### 8. Złożone metody obliczeń sił

Zewnętrzne siły oddziaływujące na ładunek w kierunku wzdłużnym, poprzecznym oraz pionowym powinny być obliczone na podstawie wzoru [2]:

$$F_{(x,y,z)} = m \cdot a_{(x,y,z)} + F_{w(x,y)} + F_{s(x,y)} \quad (2)$$

gdzie:

- $F_{(x,y,z)}$  – siły wzdłużne, poprzeczne oraz pionowe,
- $m$  – masa jednostki ładunkowej,
- $a_{(x,y,z)}$  – przyspieszenia wzdłużne, poprzeczne oraz pionowe,
- $F_{w(x,y)}$  – siły wzdłużne oraz poprzeczne wywołane przez ciśnienie wiatru,
- $F_{s(x,y)}$  – siły wzdłużne oraz poprzeczne wywołane przez fale morskie.

Podstawowe wartości dopuszczalnych przyspieszeń zostały zaprezentowane w tabeli 3.

Tabela 3

Podstawowe wartości dopuszczalnych przyspieszeń [2]

|                        | Przyspieszenia poprzeczne $a_y$ w $m/s^2$ | Przyspieszenia wzdłużne $a_x$ w $m/s^2$ |
|------------------------|---|---|
| Odkryty pokład, wysoki | 7.1 6.9 6.8 6.7 6.7 6.8 6.9 7.1 7.4       | 3.8                                     |
| Odkryty pokład, niski  | 6.5 6.3 6.1 6.1 6.1 6.1 6.3 6.5 6.7       | 2.9                                     |
| Międzypokład           | 5.9 5.6 5.5 5.4 5.4 5.5 5.6 5.9 6.2       | 2.0                                     |
| Niższa składowina      | 5.5 5.3 5.1 5.0 5.0 5.1 5.3 5.5 5.9       | 1.5                                     |
|                        | 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 L   |   |
|                        | Przyspieszenia pionowe $a_z$ w $m/s^2$    |   |
|                        | 7.6 6.2 5.0 4.3 4.3 5.0 6.2 7.6 9.2       |   |

W przyspieszeniach poprzecznych (tabela 3) została uwzględniona grawitacja oraz siły równoległe do pokładu pochodzące od falowania statku.

Podstawowe wartości przyspieszeń powinny być traktowane jako poprawne przy następujących założeniach:

- pracy na nieograniczonym obszarze,
- pracy przez cały rok,

- długości rejsu 25 dni,
- długości statku 100 m,
- prędkości eksploatacyjnej 15 węzłów,
- $B/GM \geq 13$  ( $B$  – szerokość statku,  $GM$  – wysokość metacentryczna).

Dla statków o długości innej niż 100m i prędkości eksploatacyjnej innej niż 15 węzłów wartości przyśpieszeń powinny być skorygowane o współczynnik znajdujące się w tabeli 4.

Tabela 4

**Współczynniki korekty przyśpieszeń dla długości i prędkości statku [2]**

| Długość (m) \ Prędkość (kn) | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  | 120  | 140  | 160  | 180  | 200  |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 9                           | 1,20 | 1,09 | 1,00 | 0,92 | 0,85 | 0,79 | 0,70 | 0,63 | 0,57 | 0,53 | 0,49 |
| 12                          | 1,34 | 1,22 | 1,12 | 1,03 | 0,96 | 0,90 | 0,79 | 0,72 | 0,65 | 0,60 | 0,56 |
| 15                          | 1,49 | 1,36 | 1,24 | 1,15 | 1,07 | 1,00 | 0,89 | 0,80 | 0,73 | 0,68 | 0,63 |
| 18                          | 1,64 | 1,49 | 1,37 | 1,27 | 1,18 | 1,10 | 0,98 | 0,89 | 0,82 | 0,76 | 0,71 |
| 21                          | 1,78 | 1,62 | 1,49 | 1,38 | 1,29 | 1,21 | 1,08 | 0,98 | 0,90 | 0,83 | 0,78 |
| 24                          | 1,93 | 1,76 | 1,62 | 1,50 | 1,40 | 1,31 | 1,17 | 1,07 | 0,98 | 0,91 | 0,85 |

Dla kombinacji długości oraz prędkości, które nie znajdują się w tabeli 4, może być zastosowana poniższa formuła w celu wyznaczenia współczynnika korygującego [2]:

$$\text{współczynnik bezpieczeństwa} = \left( 0,345 \cdot \frac{v}{\sqrt{L}} \right) + \frac{(58,62 \cdot L - 1034,5)}{L^2} \quad (3)$$

gdzie:

- $v$  – prędkość statku w węzłach,
- $L$  – długość statku w metrach.

Powyższy wzór nie powinien być stosowany w przypadku statków krótszych niż 50 m lub dłuższych niż 300 m. Dla statków, których wartość  $B/GM$  (szerokość statku/wysokość metacentryczną) jest mniejsza niż 13, należy dokonać skorygowania przyśpieszeń poprzecznych w oparciu o współczynnik z tabeli 5.

Siły wywołane działaniami wiatru oraz morza oddziaływujące na jednostki ładunkowe znajdujące się na odkrytym pokładzie mogą być obliczone w uproszczony sposób, przyjmując, że:

- siły wywołane ciśnieniem wiatru wynoszą  $1 \text{ kN/m}^2$ ,
- siły wywołane falami wynoszą  $1 \text{ kN/m}^2$ .

Fale marskie mogą powodować powstawanie sił znacznie większych niż początkowo zakładano. Dlatego wartości przedstawione w tabeli 4 powinny zostać uznane za minimalne po zastosowaniu odpowiednich środków zapobiegających przepływowi fali na pokładzie statku. Przy czym oddziaływanie sił pochodzących od fali musi być uwzględniane tylko od wysokości odkrytym pokładzie ładunkowego do 2 metrów ponad pokład statku lub do władu znajdującego się najwyżej.

Współczynniki korekty dla B/GM &lt; 13 [2]

| B/GM                   | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13 lub większe |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|----------------|
| Odkryty pokład, wysoki | 1,56 | 1,40 | 1,27 | 1,19 | 1,11 | 1,05 | 1,00           |
| Odkryty pokład, niski  | 1,42 | 1,30 | 1,21 | 1,14 | 1,09 | 1,04 | 1,00           |
| Międypokład            | 1,26 | 1,19 | 1,14 | 1,09 | 1,06 | 1,03 | 1,00           |
| Niższa składownia      | 1,15 | 1,12 | 1,09 | 1,06 | 1,04 | 1,02 | 1,00           |

### 9. Bilans sił i momentów

Dokonanie obliczenia bilansu sił należy wykonać zawsze dla następujących przypadków:

- przesunięć poprzecznych w kierunku sterburty,
- przesunięć wzdłużnych w warunkach ograniczonego tarcia do przodu ku rufie,
- przewróceń poprzecznych w kierunku sterburty.

W przypadku symetrycznego układu zabezpieczeń, wystarczy wykonać jedną kalkulację. Wielkość współczynnika tarcia ( $\mu$ ) przyczynia się do zapobiegania przesunięć, w celu odpowiedniego zabezpieczenia ładunków należy zapewnić odpowiedni styk materiałów. Współczynniki tarcia dla przykładowych par materiałów pokazano w tabeli 6.

Tabela 6

Współczynniki tarcia [2]

| Styk materiałów                | Współczynnik tarcia ( $\mu$ ) |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Drewno–drewno, mokre lub suche | 0,4                           |
| Stal–drewno lub stal–guma      | 0,3                           |
| Stal–stal, suche               | 0,1                           |
| Stal–stal, mokre               | 0,0                           |

### Bilans sił dla przesunięć poprzecznych

Bilans sił dla przesunięć poprzecznych powinien spełniać następujący warunek [2]:

$$F_y \leq \mu \cdot m \cdot g + CS_1 \cdot f_1 + CS_2 \cdot f_2 + \dots + CS_n \cdot f_n \quad (4)$$

gdzie:

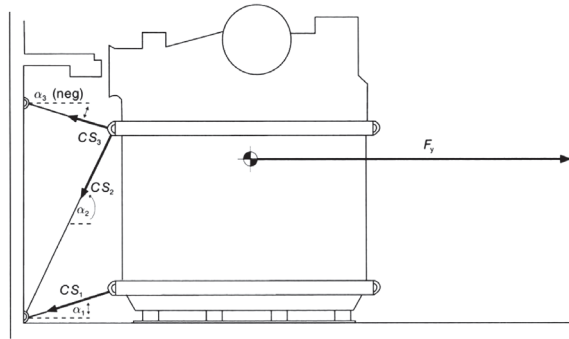
- $n$  – liczba mocowań wykorzystywanych w obliczeniach,
- $F_y$  – siły poprzeczne pochodzące z zakładanego obciążenia (kN),

- $\mu$  – współczynnik tarcia,  
 $m$  – masa jednostki ładunkowej,  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie = 9,81 m/s<sup>2</sup>,  
 $CS$  – obliczona siła zabezpieczeń poprzecznych (kN).

$$CS = \frac{MSL}{1,5} \quad (5)$$

gdzie:

$f$  – funkcja od  $\mu$  oraz kąta pionowych zabezpieczeń (tabela 7).



Rys. 5. Bilans sił poprzecznych [2]

Fig. 5. The balance of transverse forces

Tabela 7

**Wartość funkcji  $f(\alpha, \mu) = \mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha$  [2]**

| $\mu \backslash \alpha$ | -30° | -20° | -10° | 0°   | 10°  | 20°  | 30°  | 40°  | 50°  | 60°  | 70°  | 80°  | 90°  |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,3                     | 0,72 | 0,84 | 0,93 | 1,00 | 1,04 | 1,04 | 1,02 | 0,96 | 0,87 | 0,76 | 0,62 | 0,47 | 0,30 |
| 0,1                     | 0,82 | 0,91 | 0,97 | 1,00 | 1,00 | 0,97 | 0,92 | 0,83 | 0,72 | 0,59 | 0,44 | 0,27 | 0,10 |
| 0,0                     | 0,87 | 0,94 | 0,98 | 1,00 | 0,98 | 0,94 | 0,87 | 0,77 | 0,64 | 0,50 | 0,34 | 0,17 | 0,00 |

Pionowy kąt zabezpieczeń  $\alpha$  większy niż 60° powoduje zmniejszenie efektywności zabezpieczenia w odniesieniu do przemieszczeń jednostki ładunkowej. Oprzyrządowania zabezpieczające charakteryzujące się taką wielkością kąta można pominąć w bilansie sił, chyba że ładunek posiada tendencję do przewracania się lub jest zabezpieczony w trakcie transportu poprzez solidny naciąg, pozwalający na jego utrzymanie przez całą podróż.

Jakikolwiek poziomy kąt sił pochodzących od oprzyrządowania zabezpieczającego nie powinien przekraczać 30°. W przeciwnym przypadku takie zabezpieczenie może być nieskuteczne i należy rozważyć wykluczenie go z bilansu przesunięć poprzecznych.

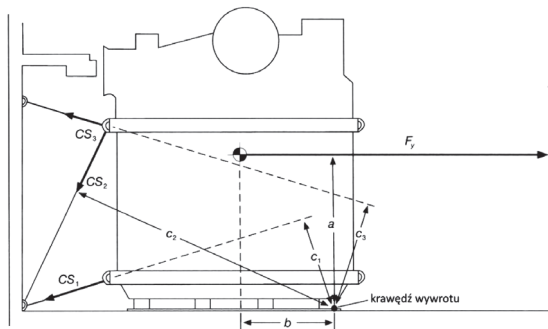
### Bilans sił ze względu na przewrócenia poprzeczne

Następujące obliczenia powinny spełniać warunki (układ przykładowych mocowań i sił zaprezentowano na rys. 6) [2]:

$$F_y \leq b \cdot m \cdot g + CS_1 \cdot c_1 + CS_2 \cdot c_2 + \dots + CS_n \cdot c_n \quad (6)$$

gdzie:

- $F_y$  – siły poprzeczne pochodzące z zakładanego obciążenia (kN),
- $m$  – masa jednostki ładunkowej,
- $g$  – przyspieszenie ziemskie = 9,81 m/s<sup>2</sup>,
- $n$  – ilość mocowań wykorzystywanych w obliczeniach,
- CS – obliczona siła zabezpieczeń poprzecznych (kN),
- $a$  – ramię siły wyrotu (m),
- $b$  – ramię siły stabilności (m),
- $c$  – ramię sił pochodzących od zabezpieczeń (m).



Rys. 6. Bilans momentów poprzecznych [2]

Fig. 6. Balance transverse moments

### Bilans sił dla przesunięć wzdłużnych

W warunkach normalnych zabezpieczenia poprzeczne są wystarczające także, aby zapobiec przemieszczeniom wzdłużnym. W razie wątpliwości co do wytrzymałości zabezpieczenia można wykonać bilans, który powinien spełniać następujący warunek [2]:

$$F_x \leq \mu \cdot (m \cdot g - F_z) + CS_1 \cdot f_1 + CS_2 \cdot f_2 + \dots + CS_n \cdot f_n \quad (7)$$

gdzie:

- $F_x$  – siły wzdłużne pochodzące z zakładanego obciążenia (kN),
- $\mu$  – współczynnik tarcia,
- $m$  – masa jednostki ładunkowej,
- $g$  – przyspieszenie ziemskie = 9.81 m/s<sup>2</sup>,
- $n$  – ilość mocowań wykorzystywanych w obliczeniach,
- $f$  – funkcja od  $\mu$  oraz kąta pionowych zabezpieczeń (tabela 7),
- $F_z$  – pionowe siły pochodzące z zakładanego obciążenia (kN),
- CS – obliczona siła zabezpieczeń wzdłużnych (kN).

$$CS = \frac{MSL}{1,5} \quad (8)$$

Wartość siły wzdłużnych zabezpieczeń poprzecznych nie powinny być większe niż  $0,5 \cdot CS$ .

## 10. Wnioski

Obowiązujące przepisy nie określają jednoznacznie, jakiego oprzyrządowania zabezpieczającego należy użyć, natomiast ustalają wymagania, jakie muszą być spełnione przy zabezpieczeniu danego typu ładunku. Określają także maksymalnie dopuszczalne wartości przyspieszeń ładunków oraz sił pochodzących od ich masy i zastosowanych zabezpieczeń. W CSS CODE podano sposoby wykonywania obliczeń w celu określenia wymaganych wartości sił dla odpowiedniego zabezpieczenia. Natomiast sam dobór zabezpieczeń dokonywany jest na podstawie posiadanych informacji o ładunku, rozmieszczeniu punktów mocujących na wagonach i promie oraz normach określających wymagania co do parametrów danego oprzyrządowania zabezpieczającego. Zastosowanie odpowiedniego rodzaju zabezpieczenia zgodnego z przepisami pozwala zmniejszyć ryzyko uszkodzenia ładunku i statku w trakcie przewozu promowych. Jest to szczególnie ważne przy przewozie podczas złych warunków pogodowych. Dlatego istotne jest, aby stosować się do określonych norm i przepisów.



Prezentowane wyniki badań zostały zrealizowane w ramach projektu EUREKA E!6726 LOADFIX dofinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju



## Literatura

- [1] Andersson N., Andersson P., Bylander R., Sökjer-Petersen S., Zether B., *Equipment for rational securing of cargo on railway wagons*, MariTerm AB, 2004.
- [2] *CSS CODE, Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing Third Edition*, IMO, Croydon 2011.
- [3] *IMO/ILO/UNECE Guidelines for Packing of Cargo Transport Units (CTUs)*, IMO, London 1997.
- [4] *Międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu, 1974 SOLAS*, PRS, Gdańsk 2006.
- [5] PN-EN 12195-1.
- [6] *Poradnik mocowania ładunku* (<http://www.unityline.pl>, stan z dnia 09.2012).
- [7] *ZAŁĄCZNIK 11 do Ogólnej umowy o użytkowaniu wagonów towarowych (AVV)*, 2008.



MARCIN MAJKA\*, TOMASZ M. MAJKA\*\*

## THE FUTURE OF THE LIGHT SOURCES

### PRZYSZŁOŚĆ ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA

#### Abstract

In this paper will discuss the main source of light, their impact on work and human health. Sources of natural and artificial light can be classified in terms of spectral and photometric. For artificial lighting are also important determining the performance characteristics of the conversion of electricity into light. In addition to these classifications, the light sources differ from each photon generation process, as well as the influence of light on the human eye. Will discuss the effects on the human eye light from organic LEDs and to what result this technology aims.

*Keywords: light source, natural and artificial light, influence of light, influence light on the human eye*

#### Streszczenie

W powyższym artykule omówiono podstawowe źródła światła i ich wpływ na pracę i zdrowie człowieka. Naturalne i sztuczne źródła światła można sklasyfikować pod względem spektralnym i fotometrycznym. Dla sztucznego oświetlenia ważne są również charakterystyki wydajności świetlnej określające wartości konwekcji energii elektrycznej na świetlną. Dodatkowo wymienione klasyfikacje różnią się sposobem generacji fotonów oraz wpływem wytworzonego światła na ludzkie oko. Omówione zostaną efekty działania światła pochodzącego z diod organicznych na ludzkie oko oraz do jakiego wyniku dąży ta technologia.

*Słowa kluczowe: źródło światła, naturalne i sztuczne światło, wpływ światła, wpływ światła na ludzkie oko*

\* Eng. Marcin Majka, Faculty of Physics, Mathematics and Computer Science, Cracow University of Technology.

\*\* MSc. Eng. Tomasz M. Majka, Faculty of Chemical Engineering and Technology, Department of Chemistry and Technology of Polymers, Cracow University of Technology

## 1. Introduction

The most important spectral parameter of the source is color temperature. This corresponds to the temperature of the blackbody, in which it emits radiation corresponding to the color-impresion, it produces investigated the source. It is an objective measure of color experience the light source. Light source because of the color divide according to the standards set by the agency adopted standards in the countries of the European Union and American into:

- Illuminants type A – color temperature of 2500 to 3500 K gives a warm light WW (Warm White), it corresponds to, for example, tungsten radiation.
- Daylight illuminants – the spectral distribution corresponds to the decomposition of averaged radiation power, with varying degrees of cloudiness and at different latitude. The most important of these is the D65 illuminant – 6500 K color temperature, which, according to European and American standards, corresponds to the average color of light between the hours of 10 and 12 local time.
- Fluorescent illuminants – 12 illuminants marked with symbols from F1 to F12 which include most of commercial lamps.

For common light sources are designated color temperatures. And so the color temperature of 2000 K is the color of light the candles, 2800 K – a very warm color (light bulb), 3000 K – Sunrise and Sunset, 3200 K – color of incandescent studio lighting, 4000 K – color white, 5000 K – Cool color, 6500 K – color of the day, 10000–15000 K – color pure blue sky, 28000–30000 K – lightning [1].

Another important parameter is the color rendering index (CRI). Is expressed as the number from 0 (for monochromatic light) to 100 (for white light). Determines how accurately perceive color lighted object. If the CAR is higher, then colors are better given away. Low coefficient of CRI have, for example, low-pressure sodium lamps, and high coefficient of CRI have sunlight. Figure 1 shows a graphical model useful in determining CRI factor.

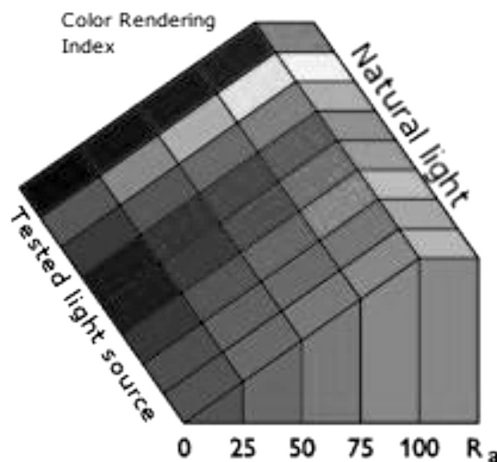


Fig. 1. Graphic design for the determination of the coefficient of CRI expressed in  $R_a$  (general colour-rendering index) [1, 3]

Rys. 1. Schemat graficzny do wyznaczania współczynnika CRI wyrażony w  $R_a$  (ogólny współczynnik oddawania barw) [1, 3]

In Table 1 are given the coefficients of CRI for the selected source radiation.

Table 1

**Color temperatures and CRI factors for some light sources [1, 3]**

| The light source                   | The color temperature [K] | CRI [ $R_a$ ] |
|------------------------------------|---------------------------|---------------|
| Low-pressure sodium                | 1800                      | 5             |
| Mercury                            | 6410                      | 17            |
| High-pressure sodium               | 2100                      | 24            |
| Mercury from the phosphor          | 3600                      | 49            |
| Fluorescence                       | 4230                      | 73            |
| Fluorescent daily                  | 6430                      | 76            |
| Quartz with pairs of metal halides | 4200                      | 85            |
| Ceramic metal halide               | 5400                      | 96            |
| Thermal/halogen bulb               | 3200                      | 100           |

According to the accepted norms of the source were evaluated in view of the color rendering index CRI. Table 2 presents the sources in the numerical classification of coefficient of CRI.

Table 2

**Division sources due to the group by CRI factors**

| Group |    | Color rendering quality | CRI    |
|-------|----|-------------------------|--------|
| 1     | 1A | ideal                   | 90–100 |
|       | 1B | very good               | 80–89  |
| 2     | 2A | good                    | 70–79  |
|       | 2B | satisfactory            | 60–69  |
| 3     |    | sufficient              | 40–59  |
| 4     |    | insufficient            | 20–39  |

The most typical sources of natural light is thermal radiation resulting from the emission of photons from a blackbody. The value of radiation energy emitted by a black body which is in thermodynamic equilibrium with the environment is equal to the radiation energy absorbed from the outside by the body. If the body temperature is higher, the radiation that is emitted by the heat of the body is called thermal radiation. If the ambient temperature is higher than body temperature, the emission processes will dominate the absorption. Conversely, when the body temperature is higher. Planck's theory describes the emission of a black body was a turning point in the development of physics. The formula for the capacity issue is the following function of the frequency distribution of light.

$$R_T(\nu) = \left( 8\pi \frac{\nu^2}{c^3} \right) \left( \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \right) \quad (1)$$

where:

$h\nu$  – frequency  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  of the photon energy,  
 $h$  – Planck's constant.

Total emission of thermal radiation energy is the sum of values for all wavelengths:

$$\int_0^{\infty} R_\lambda d\lambda \quad (2)$$

After converting variable frequency wavelengths and by integrating over all lengths receive the Stefan's law formulated empirically before Planck, which states that the total capacity of the blackbody emission  $R(T)$  at  $T$  is equal to the total energy emitted in unit time per unit area of a black body at a temperature  $T$ .

$$R(T) = \sigma T^4 \quad (3)$$

where  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$  is the Stefan-Boltzmann constant.

Finding the distribution of Planck's radiation peaks at different temperatures, we can conclude that the spectrum of the radiation is shifted towards higher frequencies (shorter wavelengths). This is called Wien's displacement law also empirically found before reaching the Planck model:  $\nu_{\max} \sim T \Rightarrow \lambda_{\max} T = \text{const.}$  – where  $\nu_{\max}$  is frequency and  $\lambda_{\max}$  is wavelength for which  $R_\lambda(\nu)$  has a maximum value of temperature  $T$ .

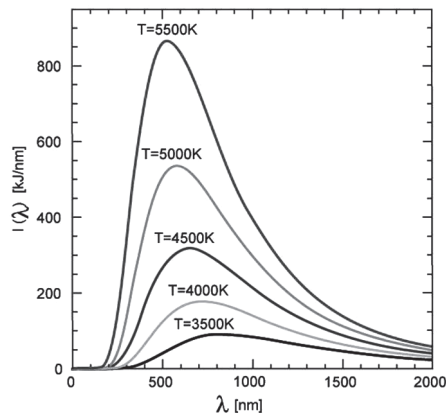


Fig. 2. Ability distributions of the emission of a black body radiation [1, 2, 4]

Rys. 2. Rozkłady zdolności emisyjnych promieniowania ciała doskonale czarnego [1, 2, 4]

The distribution of sunlight emissivity differs from the distribution of a blackbody at the same temperature as the Sun  $T = 5800$  K. Figure 3 shows the spectral distribution of sunlight on Earth observed. The greatest value of the thermal radiation from the Sun is observed for the length of 550 nm.

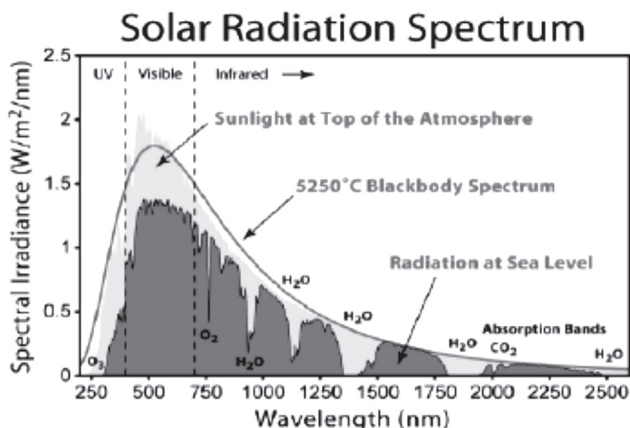


Fig. 3. Spectral distribution of solar radiation observed at the earth's surface [4]

Rys. 3. Widmowy rozkład promieniowania słonecznego obserwowany na powierzchni ziemi [4]

Solar radiation is attenuated by the earth's atmosphere, for example, ozone molecule absorbs the ultraviolet radiation and the molecule  $H_2O$  and  $CO_2$  certain infrared bands.

Bulbs are typical representatives of the sources of continuous emission spectrum. So the temperature of their spectral distribution is equal to the color temperature. Temperature parameters bulbs practically does not depend on the material from which the filament is made, and only the value of temperature to which they are heated. Distribution close to the decay of a black body is a classic tungsten. However, the standard bulb light output is low (about 20 lm/W), which leads the governments of many countries to withdraw them from the market. Thermal lamp halogen lamps are equipped with a tungsten filament is the same as an ordinary light bulb, filled with inert gas with a small amount of halogen, which regenerates the filament, preventing the spraying.

Another of thermal radiation is the light coming from sources of luminescence. Luminescence comes from the pass energy in atoms, molecules, chemical or solids. The spectra of light emitted by the atoms and molecules are characteristic of them, which is why the study of these spectra allows the identification of emitting atoms and molecules. Based on this fact, the method of testing the chemical composition of the substance is called spectral analysis. Luminescence can occur under the influence of an electric field (electroluminescence), ambient light (photoluminescence), can also be thermally stimulated (thermoluminescence – cold glow). Photoluminescence is caused by the absorption of radiation in the visible light region, ultraviolet or infrared. Absorbed energy is the emitted in the form of light energy, less than the energy of excitation light. Electroluminescence of gas is the result of the electrical discharge. There is also some solids as results from a variable or a constant electric field. The most commonly used artificial light sources are luminescent lamps which include:

- fluorescent lamps – these lamps phosphor coated on the inside filled with mercury vapor and argon. Inorganic phosphors are materials doped small amount of rare earth ions or transition metal. By appropriate selection of the phosphor can change the color temperatures from 4000 K (white) to 6500 K (color daily);
- high-pressure mercury lamps – the radiation source is a mercury vapor discharge at high pressure (for example, around 1 MPa);
- mercury halogen lamp – with the introduction of metal halides (silver) is smoothed out their characteristics;
- sodium lamp – center of the discharge are sodium vapor and auxiliary gas (mixture of neon and argon). Due to the vapor pressure of sodium in the lamps are divided into low and high pressure. Low-pressure emit a distinctive gold – orange light. High pressure sodium lamps have lower efficiency but higher rates of CRI;
- xenon lamp – xenon pressure in the range from 8 to 30 atmospheres. Light is produced by electric arc formed between electrodes placed in the environment of xenon.

Table 3 presents the efficiency of different sources of light for illumination.

Table 3

**The luminous efficacy of some light sources [4]**

| Light source          | Luminous flux [lm/W] |
|-----------------------|----------------------|
| ordinary bulb         | 8...20               |
| halogen bulb          | 20...30              |
| fluorescent lamp      | 40...90              |
| ordinary mercury      | 30...65              |
| mercury-filament lamp | 17...25              |
| halogen mercury       | 75...100             |
| low-pressure sodium   | 80...180             |
| High-pressure sodium  | 90...120             |

LEDs (Light-emitting diodes) are p-n connectors, selected semiconductor materials. Operation of the LEDs based on the phenomenon of recombination radiant. Emission is caused by current flow in pn junction, polarized in the direction of conduction. LEDs are at the moment the most durable light source. Some LEDs are lit continuously up to 100 000 hours. LEDs are great competitors for light bulbs and fluorescent lighting in the area of white light. High quality LEDs are up to ten times more light output than incandescent bulbs. Currently, traditional lighting and halogen lamps are replaced with high-performance LEDs. LED lights do not emit harmful ultraviolet light for the people, the light is not flashing, no stroboscopic effect, you can design the desired color temperature. Today's LEDs have an efficiency of the order of 20 ... 40%, which makes them very efficient sources of colored light. They produce light with a luminance of one thousand candelas per square meter. But the resolution of the screens where are installed LED matrix is small so they are used mainly in the billboards. The new technologies are already used organic LED (OLED). You can get big their density per area unit and the high flexibility and small thickness of the screens.

The eye allows us to gain a very large amount of information about their surroundings. It allows us to safely navigate in space. Image captured by the retina of the eye is its pre-processed and sent through the optic nerve to the brain. There, by the centers is recorded,

processed and interpreted. Retina is the beginning of the nervous system leading to the brain. It consists of more than a hundred million light-sensitive nerve endings of two kinds. Because of their shape, they are called rods and cones. Rods is about 120 million, and about 6 million cones.

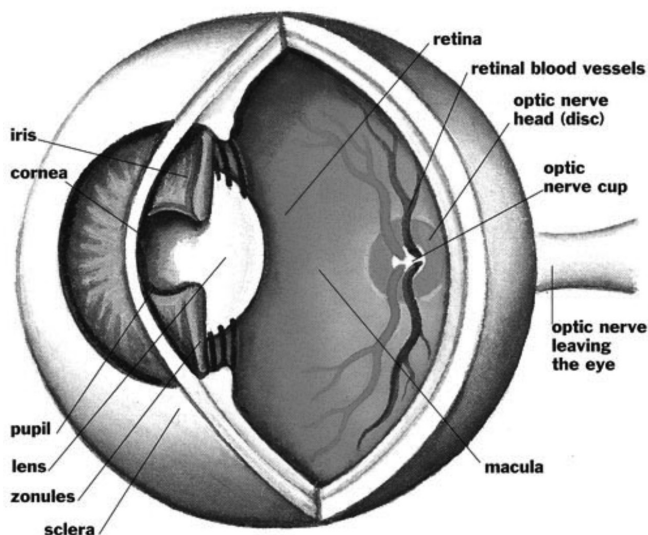


Fig. 4. The composition of the human eye [5]

Rys. 4. Budowa ludzkiego oka [5]

Rods are distributed throughout the retina, in addition to a yellow spot in the center of the visual axis. Cones are concentrated precisely in the yellow dot and are quite rare in the rest of the retina. Cones enable color vision, while the rods are responsible for the perception of shape and movement. Throughout the period of the evolution of visual receptors have adapted to white light coming from the Sun. Eyestrain and diseases associated with it are usually caused by working with artificial light is not coming from the Sun. Blinking lights, strobe lights as well as unnatural spectrum has a huge impact on the human eye, which in turn moves the time and its effectiveness.

## 2. Methods

Analysis of the light from the various tubes may be made due to the many factors of their properties. Hardly anyone wonders what impact has produced a light on the human eye. Many lamps illuminate our jobs or homes, they produce light in an unnatural way to the light sources on Earth. How easily can infer from this, the human eye is not accustomed to the light of artificial origin. Only the origin of the solar light to the human eye is most relevant, because the human eye is adapted to the spectrum of sunlight. Therefore, spectroscopic measurements made for artificial light sources can give meaningful information about the positive or negative impact on the health of the eyes.

Using a digital spectrometer for the analysis of the emission spectrum, it is possible to capture and compare lamp spectrum with the spectrum of sunlight. The test lamp should be placed so that the light produced by the courts come into the spectrometer. The entire spectrum measurement must be performed in the dark, so that light from other laboratory equipment did not affect the results. Figure 5 shows a schematic diagram of the light spectrum measuring apparatus.

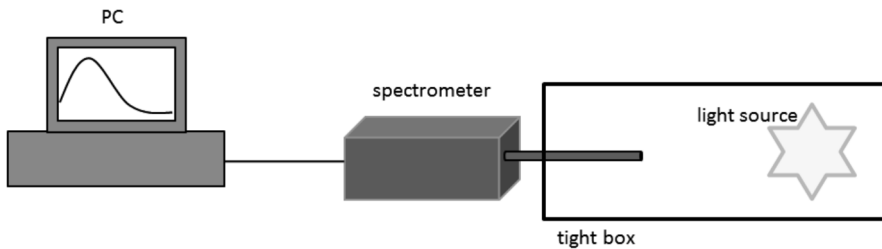


Fig. 5. Diagram of the system for measuring spectrum for different light sources

Rys. 5. Schemat układu pomiarowego widma świetlnego dla różnych źródeł światła

To improve the quality of measurement, you can use the integrating sphere. Integrating sphere connected on pin of spectrometer captures the spectrum of the total light flux. Since the spectrometer is not required that the wavelength range was wider than the wavelength of visible light.

### 3. Results and Discussion

Measurement of the spectrum of light sources is performed in order to compare it with the spectrum of day light. The spectrum is more similar to the solar spectrum, the human eye is working on the light slowly gets tired, and thus is less exposed to disease. Contrary to general belief, it has just bulbs from the beginning have a spectrum as close to natural daylight. Contrary to the general belief, the light bulb is characterized by a spectrum closest to natural daylight. Figure 6 shows the spectrum of the light bulb compared to the solar spectrum.

The above figure shows that the light bulb has spectral characteristics similar to sunlight. Despite this, the bulbs are slowly withdrawn from the domestic markets and are replaced by energy saving light bulbs.

In the case of luminescent lamps, there is a spectrum unnatural. Although these lamps have a high power efficiency, the light produced is not similar to the solar spectrum. Figure 7 shows a spectrum for P-VIP halogen discharge lamp (Special version for original equipment manufacturers named P-generation Video Projectors). Solar spectrum can be approximated by a black body spectrum with a temperature of 6000 Kelvin. The spectrum of P-VIP lamp halogen discharge does not even have a course similar to the said a black body spectrum.

The next light sources are LEDs. Interestingly, the white LED light is most similar to the solar spectrum only when the light is produced by a combination of three colors: red, green, and blue. With this type of physics, it is possible to adjust the individual LED spectra to the total spectrum was most similar to the solar spectrum. Figure 8 is a sample of the LED spectrum.



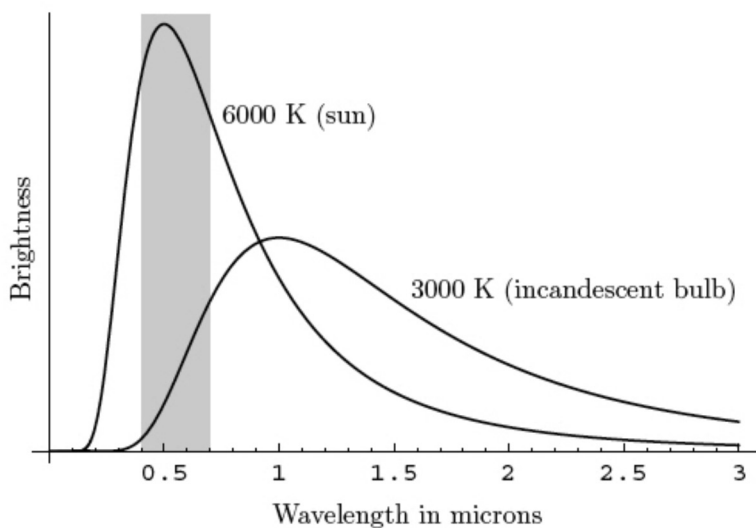


Fig. 6. Sample spectrum light bulbs and the sun [7]

Rys. 6. Przykład widma żarówki oraz widma słonecznego [7]

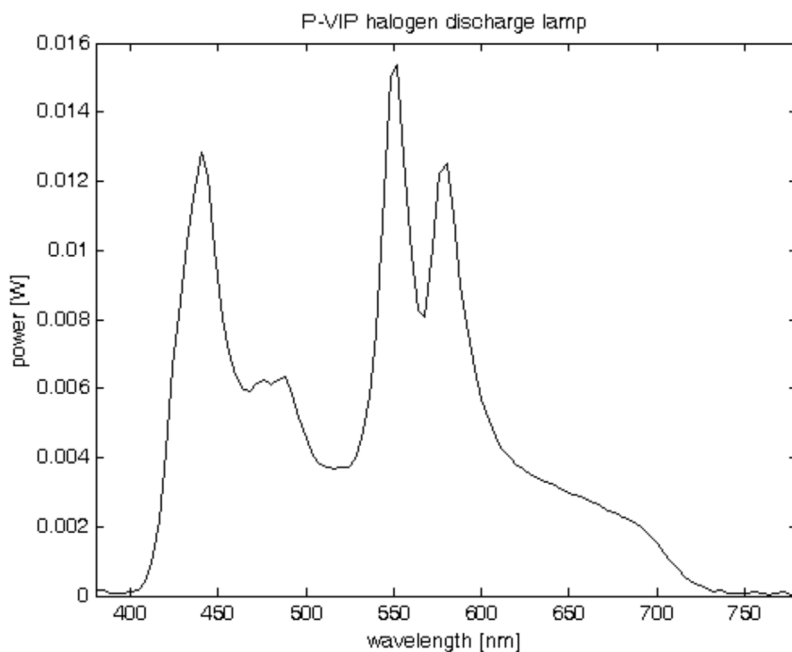


Fig 7. The spectrum of P-VIP lamp halogen discharge [8]

Rys. 7. Widmo lampy halogenowej P-VIP [8]

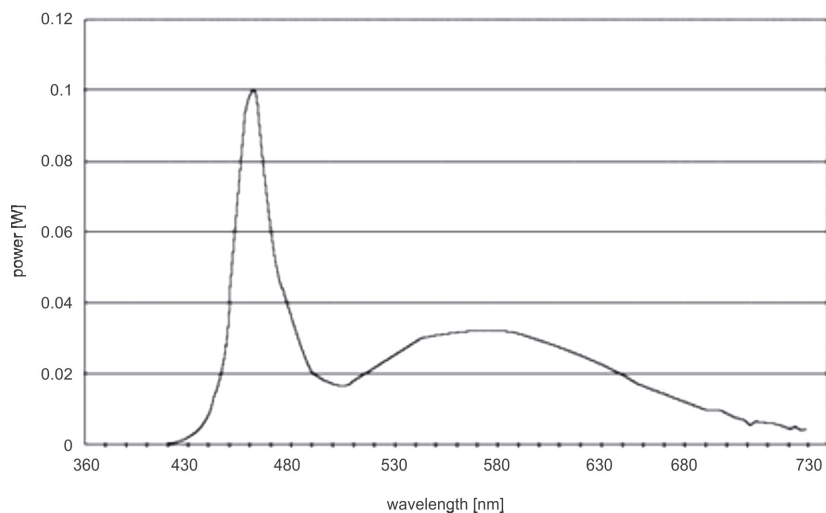
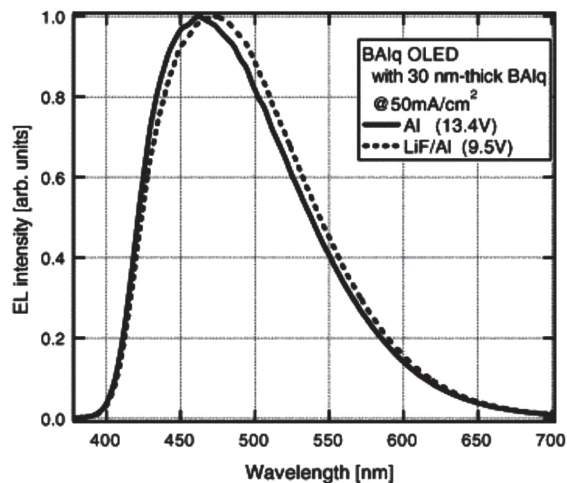


Fig. 8. Sample spectrum of white LED [9]

Rys. 8. Przykład widma światła białego LED [9]

The latest technology of organic LEDs is hoping for a cheap and healthy source of light. The current spectrum is very similar to the solar spectrum. This gives great hope for the future that healthy light will be available to all. Figure 9 is an example of spectrum for BA1q {aluminum (III) bis(2-methyl-8-quinolinato)-4-phenylphenolate} OLED. Research is still going on even more similar spectrum of OLED.

Fig. 9. The Electroluminescence spectrum of BA1q OLED with Al cathode and BA1q OLED with LiF/Al cathode at the current density of 50 mA/cm<sup>2</sup> [10]

Rys. 9. Widmo elektroluminescencyjne bis(2-metylo-8-chinolino)-4-fenylofenolan glinu (III) (BA1q) OLED z katodą glinową oraz BA1q OLED z katodą LiF/Al dla gęstości prądu 50mA/cm<sup>2</sup> [10]

#### 4. Conclusions

In the above work have been presented different types of lighting. Presented lamps are different methods of generating light and their impact on human eyes. The evolution adapted our eyes to the sun light, that is, the light of which the most often encounter. Therefore, in our discussion constantly comparing various sources to sunlight. To sum up this analysis, it can be stated unequivocally, that OLED is the future of not only technological, but also health. By adjusting the light to our needs, we will be able to work longer, and thus more efficient than the older light sources. Even so popular energy-saving light bulbs are not able to produce as a healthy light as organic LEDs. With OLED toys for children will no longer harm the eye from a young age. Our future is in organic LEDs.

#### References

- [1] Wiśniewski A., *Electric light sources*, Warsaw University of Technology, 2009.
- [2] Žukauskas A., Shur M., Gaska R., *Introduction to solid-state lighting*, J. Wiley, 2002.
- [3] Helbig E., *Podstawy fotometrii*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1975.
- [4] Beckmann P., Spizzichino A., *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Pergamon Press Oxford, London, New York, Paris, 1963.
- [5] Wright D.W., *The measurement of colour*, Hilger & Watts Ltd, London 1958.
- [6] Bielecki Z., Rogalski A., *Detekcja sygnałów optycznych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2009.
- [7] [http://www.sciencebuddies.org/science-fairprojects/project\\_ideas/](http://www.sciencebuddies.org/science-fairprojects/project_ideas/)
- [8] Beretta G., *Hot body, excited particles, and the north sky*, The Mostly Color Channel, 2007.
- [9] <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap21/chap21.htm>
- [10] Hyoung K., Sang-Hwan C., Jeong O., Yong-Hee L., Jun-Ho L., Jae-Gab L., Soo-Kang P., Young-Il P., Jong-Wook P., Young P., *Deep blue, efficient, moderate microcavity organic light-emitting diodes*, Organic Electronics, 11, 2010.



TOMASZ M. MAJKA, KRZYSZTOF PIELICHOWSKI,  
AGNIESZKA LESZCZYŃSKA\*

## WPŁYW CHŁONNOŚCI PŁYNÓW EKSPLOATACYJNYCH STOSOWANYCH W MOTORYZACJI PRZEZ KOMPOZYTY PA-6/MMT NA ICH WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE

### THE INFLUENCE OF ABSORPTION OF FLUIDS USED IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY BY THE PA-6/MMT COMPOSITES ON ITS MECHANICAL PROPERTIES

#### Streszczenie

Ze względu na potencjalny obszar zastosowań nanokompozytów poliamidowych w przemyśle motoryzacyjnym w ramach niniejszego artykułu określono górną granicę chłonności wody demineralizowanej, płynu do chłodziw, płynu do spryskiwaczy, płynu hamulcowego, benzyny bezołowiowej oraz 15% roztworu soli drogowej, dla nanokompozytu poliamid-6 z 3% (m/m) zawartością montmorylonitu (PA-6/MMT). Uzyskane wyniki porównano z wartościami otrzymanymi dla poliamidu-6. W pracy przedstawiono również wpływ długotrwałego działania każdego płynu na właściwości wytrzymałościowe zarówno nanokompozytów PA-6/MMT, jak i czystej matrycy poliamidowej.

*Słowa kluczowe: poliamid, montmorylonit, nanokompozyt*

#### Abstract

A potential range of applications of polyamide nanocomposites is in the automotive industry. Therefore, in the present work, the upper limit of absorption of demineralized water, antifreeze, washer fluid, brake fluid, gasoline and 15 wt% salt solution for roads, in polyamide-6 nanocomposite with 3 wt% content of montmorillonite (PA-6/MMT), was determined. The results were compared to the values obtained for the nylon-6. The study also showed the effect of long-term action of any fluid on the mechanical properties of both PA-6/MMT nanocomposites and pure polyamide matrix.

*Keywords: polyamide, montmorillonite, nanocomposite*

\* Mgr inż. Tomasz M. Majka, prof. dr hab. inż. Krzysztof Pielichowski, dr inż. Agnieszka Leszczyńska, Katedra Chemii i Technologii Polimerów, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Nanokompozytami polimerowymi można określić materiały, w których fazę ciągłą (matrycę) stanowi polimer, natomiast fazę rozproszoną (zdyspergowaną) – nanonapełniacz, charakteryzujący się co najmniej jednym wymiarem w skali nanometrycznej. W prowadzonych dotychczas badaniach nad nanokompozytami polimerowymi zastosowano jako matrycę polimerową większość znanych termoplastycznych związków wielkocząsteczkowych [1–3]. Wśród tych matryc istnieje wąska grupa polimerów odznaczająca się wyższą wytrzymałością mechaniczną, zwanych polimerami inżynierskimi. Są nimi polipropylen, poliwęglan, poliamid, poli(metakrylan metylu), a także polioksymetylen. Te związki chemiczne są stosowane do wytwarzania bardzo wyszukanych aplikacji i konstrukcji przemysłowych [3–4]. Natomiast stosowane napełniacze można podzielić pod względem budowy na następujące trzy grupy [4]:

- nanonapełniacze jednowymiarowe (1D) – nanowłókna lub nanorurki węglowe,
- nanonapełniacze dwuwymiarowe (2D) – krzemiany warstwowe, grafeny,
- nanonapełniacze trójwymiarowe (3D) – sadza, krzemionka, tlenki metali.

W nanotechnologii polimerów szeroko badany, a także stosowany w praktyce jako nanonapełniacz jest montmorylonit (MMT), będący przedstawicielem krzemianów warstwowych, skał występujących również w Polsce. Montmorylonit jest zbudowany z pakietów warstw o trójwarstwowej strukturze krystalograficznej typu 2:1, zawierającej jedną warstwę oktaedryczną zamkniętą między dwiema warstwami tetraedrycznymi. Ładunek warstw MMT jest ujemny i równoważony kationami znajdującymi się pomiędzy warstwami [4–7]. Grubość warstwy pakietowej wynosi około 1 nm. Ważnym zabiegiem technologicznym jest organofilizacja powierzchni warstw glinokrzemianu, mająca na celu rozsuniecie warstw oraz zwiększenie stopnia hydrofobowości powierzchni MMT. W tym celu stosuje się głównie kationy organiczne np. czwartorzędowe sole amoniowe [8–9]. Tak przygotowany montmorylonit może służyć jako odpowiedni składnik do wytwarzania nanokompozytów polimerowych następującymi metodami [4–9]:

- dyspergowanie i adsorpcja – modyfikowany montmorylonit dysperguje się w rozpuszczalniku, w którym także rozpuszcza się polimer. W środowisku rozpuszczalnika nanonapełniacz ulega procesom interkalacji (wprowadzenie substancji organicznej pomiędzy warstwy pakietów) i/lub eksfoliacji (całkowita utrata struktury warstwowej, a płytki nanonapełniacza zostają rozseparowane łańcuchami polimeru), natomiast związek wielkocząsteczkowy lokuje się na powierzchni oraz wnika w przestrzenie międzypakietowe glinokrzemianu. W następnym etapie zachodzi odparowanie rozpuszczalnika i wytworzenie nanokompozytu polimer/montmorylonit;
- polimeryzacja interkalacyjna *in situ* – zmodyfikowany montmorylonit dysperguje się w ciekłym monomerze lub prepolimerze, a następnie przeprowadza się polimeryzację monomeru lub przedłużenie łańcucha prepolimeru. Stosowane inicjatory lub katalizatory także dyfundują do przestrzeni międzywarstwowych i tam inicjują, a następnie przyspieszają proces polimeryzacji *in situ*;
- interkalacja w stanie stopionym – w tej metodzie zmodyfikowany montmorylonit dysperguje się w gorącym stopie polimeru w warunkach przetwórstwa. Pod wpływem sił ścinających i temperatury następuje interkalacja i/lub eksfoliacja warstw montmorylonitu w matrycy polimeru termoplastycznego. Proces realizuje się w wylączarce dwuślimakowej, która zapewnia odpowiednie parametry ujednorodnienia i transportu składników kompozycji.

Najbardziej rozpowszechnioną i najprostszą metodą otrzymywania nanokompozytów polimerowych jest ostatnia z prezentowanych technik – interkalacja w stanie stopionym [6, 8, 9]. Korzystając z tej metody w Laboratorium Przetwórstwa Nanomateriałów Polimerowych w Katedrze Chemii i Technologii Polimerów Politechniki Krakowskiej, otrzymano wiele nanokompozytów polimerów inżynierskich, m.in. polipropylenu i polioksymetylenu. Obecne prace dotyczą polepszenia właściwości fizykochemicznych w tym wytrzymałości mechanicznych i efektu barierowego nanokompozytów poliamidowych z montmorylonitem.

## **2. Charakterystyka surowców**

Poliamid-6 (PA-6) o nazwie handlowej Tarnamid® T30 zakupiono w Zakładach Azotowych w Tarnowie – Mościcach S.A.

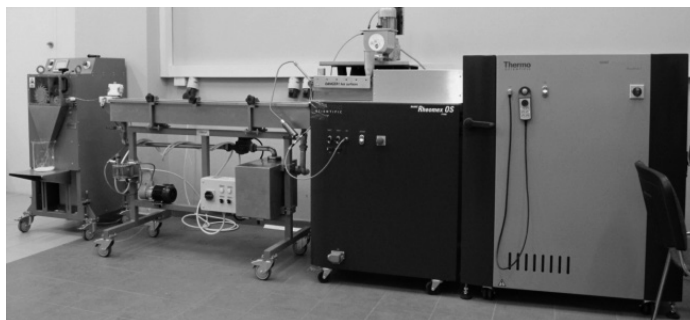
Montmorylonit o nazwie handlowej Dellite® 72T został dostarczony przez firmę Laviosa Chimica Mineraria S.p.A. Ta odmiana montmorylonitu modyfikowana jest komercyjnie solą dimetyloamoniową zawierającą dwa długie łańcuchy węglowodorowe.

Do badania chłonności wykorzystano kilka stosowanych powszechnie w motoryzacji cieczy, tj.:

- wodę demineralizowaną – zakupioną w firmie FENIKS Sp. z o.o.;
- płyn do chłodnicy – PETRYGO Q – producent Polski Koncern Naftowy ORLEN S.A.;
- płyn do spryskiwaczy – zakupiony w firmie FENIKS Sp. z o.o.;
- płyn hamulcowy – o nazwie handlowej LOTOS DOT-4;
- benzynę – Benzyna BP 95 zakupiona na stacji paliw BP;
- 15% roztwór soli drogowej w wodzie demineralizowanej – sól drogowa dostarczona z Kopalni Soli KŁODAWA S.A.

## **3. Charakterystyka maszyn przetwórczych, urządzeń i aparatów pomiarowych**

Do sporządzania nanokompozytów polimerowych wykorzystano mini linię technologiczną (rys. 1), w skład której wchodzi: współbieżna wylączarka dwuślimakowa Rheomex PTW 16/25 XL firmy HAAKE Thermo Scientific, wanna chłodząca oraz granulator ZAMAK G-16/325. Suszenie i kondycjonowanie materiałów przeprowadzono w suszarce próżniowej Horyzont Spt 200, zaopatrzonej w pompę próżniową Vacuum pump WT-6A osiągającą próżnię maksymalną 10 Pa. Wszystkie materiały do badań w postaci belek, zostały wykonane za pomocą laboratoryjnej wtryskarki tłokowej ZAMAK WT 12 ZMK/102/09.



Rys. 1. Linia do produkcji granulatu

Fig. 1. The pellets production line

#### 4. Metoda sporządzania nanokompozytów poliamid-6/montmorylonit

Przed przystąpieniem do sporządzania nanokompozytów surowce zostały wysuszone w laboratoryjnej suszarce próżniowej. Poliamid suszono w temperaturze  $80^{\circ}\text{C}$  w czasie 3 godzin. Montmorylonit suszono w temperaturze  $150^{\circ}\text{C}$  również w czasie 3 godzin. W obu przypadkach suszenie odbywało się w próżni  $0,8 \text{ kG/cm}^2$ . Po wysuszeniu surowców wykonano przedmieszki poliamidu-6 z 3% (m/m) dodatkiem montmorylonitu.

Nanokompozyty zostały wykonane metodą interkalacji w stopie przy użyciu mini linii technologicznej. Dla porównania wytłoczono również czystą matrycę poliamidową.

Otrzymany granulatu ponownie wysuszone w laboratoryjnej suszarce próżniowej w temperaturze  $80^{\circ}\text{C}$  w czasie 2 godzin i pozostawiono w próżni  $0,8 \text{ kG/cm}^2$  do uzyskania przez granulatu temperatury pokojowej.

#### 5. Metody badań

W prezentowanym artykule wykonano pomiary zmian masy próbek czystej matrycy poliamidowej oraz próbek nanokompozytów poliamidowych z 3% udziałem masowym modyfikowanego komercyjnie montmorylonitu. Próbki umieszczono w naczyniach wypełnionych 1 litrem danej cieczy stosowanej w motoryzacji i moczone przez okres blisko 164 dni. Po tym okresie wszystkie próbki poddano badaniu wytrzymałości na zginanie, a otrzymane wyniki porównano z wynikami próbek wzorcowych.

#### 6. Dyskusja wyników

Wyniki przeprowadzonych badań (rys. 2) pokazują jednoznacznie, że próbki moczone w wodzie demineralizowanej osiągnęły maksimum chłonności po 84 dniach, a masa belek wzrosła o 9,8% dla poliamidu-6 i 9,7% dla nanokompozytu. Dla próbek moczonych w 15% (m/m) roztworze soli drogowej otrzymano wyniki zbliżone do wyników czystej wody demineralizowanej. Jednak osiągnięcie tego maksimum nastąpiło dopiero po 164 dniach prowa-

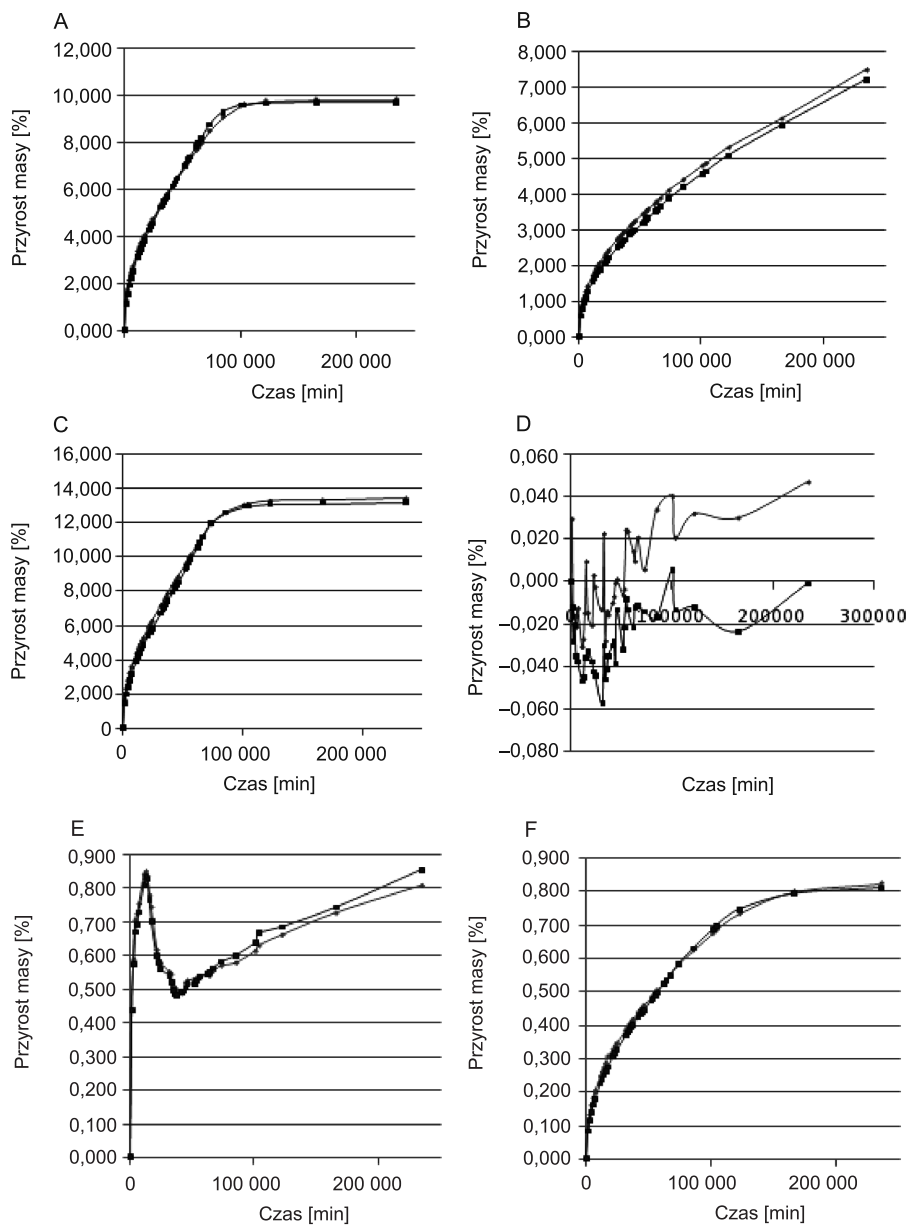


dzenia badań. Maksimum chłonności dla materiałów moczonych w płynie do chłodnicy nie zostało osiągnięte. Z wykresów wynika nadal tendencja wzrostowa, a masa badanych materiałów w 164 dniu była większa o 7,5% dla belek z PA-6 i 7,2% dla belek nanokompozytu od ich masy pierwotnej.

Największą chłonność uzyskano dla zimowego płynu do spryskiwaczy. Tutaj wartości maksymalne chłonności wyniosły po 84 dniach 13,3% dla czystej matrycy i 13,1% w przypadku nanokompozytu poliamidowego. Niską chłonność zaobserwowano dla próbek moczonych w benzynie. Maksymalna wartość uzyskana w ciągu 164 dni wykonywania badania równa jest 0,8% zarówno dla PA-6, jak i dla PA-6/MMT. Najciekawszy wynik uzyskano dla materiałów moczonych w płynie hamulcowym. Próbki badane w ogóle nie chłonęły płynu, a ich wartości maksymalne chłonności wynosiły zaledwie 0,047% po 164 dniach.

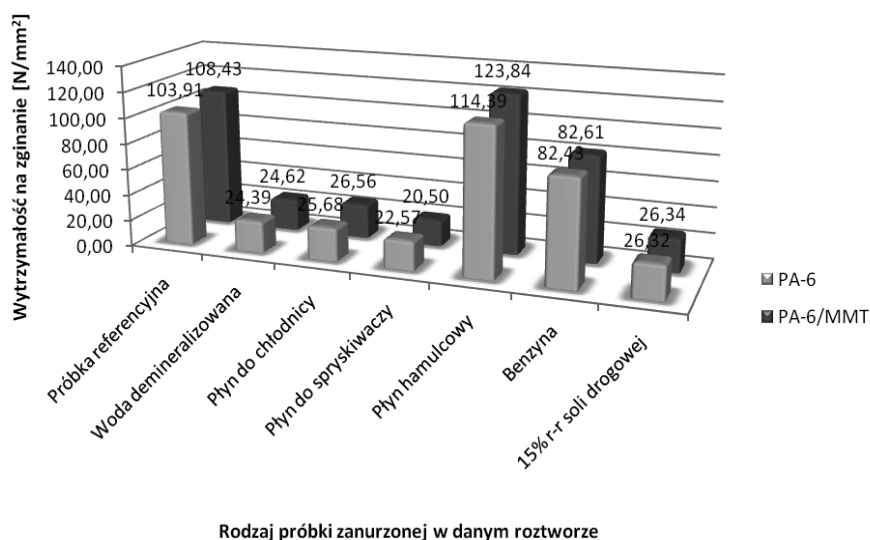
Z tych wyników nasuwa się kilka podstawowych wniosków. Po pierwsze, chłonność próbek nanokompozytów poliamidowych i czystej matrycy praktycznie pozostawała zbliżona we wszystkich przypadkach. Po drugie, te materiały nie nadają się do otrzymywania aplikacji, gdzie będą miały one kontakt bezpośredni i długotrwały z rozpuszczalnikami polarnymi, zawierającymi w swoim składzie wodę lub glikol dietylenowy. Natomiast znakomicie nadają się do wytwarzania zbiorników, pomp paliwowych i ich elementów, np. złączy, które będą miały bezpośredni kontakt z paliwem napędowym lub płynem hamulcowym.

Uzupełniające informacje na temat potencjalnego zastosowania tych materiałów dostarczyły wyniki wytrzymałości na zginanie. Potwierdziły się przypuszczenia, iż większa chłonność cieczy obniża znacząco wytrzymałość mechaniczną tych materiałów. W prezentowanym na rys. 3 rankingu zwycięzcą okazał się płyn hamulcowy. Właściwości mechaniczne materiałów moczonych przez 164 dni w płynie hamulcowym nie tyle pozostają nie zmienione, lecz nieco się zwiększają. Ten efekt można zapewne tłumaczyć reakcją pomiędzy cząsteczkami związków wchodzących w skład płynu a matrycą poliamidową. Jednak, aby potwierdzić słuszność tych przypuszczeń, należy powtórzyć badania mechaniczne oraz zbadać strukturę tych materiałów zarówno przed wykonaniem moczenia, jak i po 164 dniach. Można tutaj pokusić się o stwierdzenie, że dodatek nanonapełniacza tylko w minimalnym stopniu zwiększa wytrzymałość matrycy i jego produkcja masowa nie ma większego znaczenia. Jednak (dla sceptyków nanotechnologii) należy podkreślić, że badania zostały wykonane dla 3% udziału masowego. Na podstawie doniesień literatury naukowej można się spodziewać, iż zwiększenie udziału masowego nanonapełniacza zwiększy również i wytrzymałość mechaniczną, dając zielone światło do wdrożenia tych materiałów w motoryzacji.



Rys. 2. Wyniki chłonności: A) wody demineralizowanej, B) płynu do chłodziac, C) płynu do spryskiwaczy, D) płynu hamulcowego przez PA-6 (linia ciemna) i nanokompozyt PA-6/MMT (linia jasna), E) benzyny bezołowiowej; F) 15% roztworu soli drogowej przez PA-6 (linia ciemna) i nanokompozyt PA-6/MMT (linia jasna)

Fig. 2. The results of absorption: A) deionized water, B) antifreeze, C), washer fluid, D) brake fluid by PA-6 (dark line) and PA-6/MMT nanocomposite (light line), E) unleaded gasoline, F) 15 wt% salt solution road by PA-6 (dark line) and PA-6/MMT nanocomposite (light line)



Rys. 3. Wytrzymałość na zginanie próbek PA-6 i PA-6/MMT po 164 dniach moczenia w płynach motoryzacyjnych

Fig. 3. The flexural strength of PA-6 and PA-6/MMT after 164 days immersion in automotive fluids

## 7. Wnioski

Analiza wykonanych badań pozwoliła uzyskać informację na temat maksymalnej procentowej chłonności poszczególnych badanych cieczy przez nanokompozyty PA-6/MMT i matrycę PA-6. Poznano czas, po którym dana próbka osiąga maksimum chłonności i dalsze moczenie nie zmienia już masy materiału. Badania wytrzymałości na zginanie belek poliamidu-6 i nanokompozytów poliamidowych z montmorylonitem tak przed moczeniem, jak i po 164 dniach moczenia w płynach motoryzacyjnych dowiodły jak istotny wpływ na właściwości mechaniczne posiada długotrwały kontakt tych materiałów z poszczególnymi roztworami. Daje to podstawową informację na temat zastosowania tych materiałów w aplikacjach motoryzacyjnych.

Przedstawione wyniki pokazały, że wyroby z nanokompozytów poliamidowych z montmorylonitem mogą znaleźć zastosowanie do produkcji pomp paliwowych i zbiorników na płyn hamulcowy, a także baków. Otrzymane materiały są lekkie, a ich wytrzymałość mechaniczna zostaje zwiększona poprzez dodatek nanonapełniacza. Pomimo iż wartości wytrzymałości na zginanie nanokompozytów nie są zaskakująco większe od wartości wytrzymałości matrycy, należy wziąć pod uwagę fakt, że jeżeli chodzi o bezpieczeństwo ludzi biorących udział w wypadku samochodowym, nieraz małe wartości, a w tym przypadku wartości zwiększenia wytrzymałości mechanicznej mogą odgrywać wielką rolę.

## Literatura

- [1] Gnatowski A., Suberlak O., Koszkuł J., *Wpływ parametrów przetwórstwa na właściwości fizyczne kompozytów polipropylen/poliamid z zastosowaniem jako napelnia-cza poliwinylpirolidonu*, Kompozyty, 2006, 66-70.
- [2] Mirvar S.E., Kaleybar R.M., Afsari A., *Optimization of Injection Molding Process Parameters to Increase the Tensile Strength in Polyamide-Specimen Using the Taguchi Method*, Journal Advanced Materials Research, 341-342, 2012, 395-399.
- [3] Mishra S., Sonawane S.S., Shimpi N.G., *Influence of organo- montomorillonite on mechanical and rheological properties of polyamide nanocomposites*, Applied Clay Science, 46, 2009, 222-225.
- [4] Yu S., Zhao J., Chen G., Juay Y.K., Yong M.S., *The characteristics of polyamide layered-silicate nanocomposites*, Journal of Materials Processing Technology, 192-193, 2007, 410-414.
- [5] Olejnik M., *Nanokompozyty polimerowe – rola nanododatków*, Techniczne Wyroby Włókiennicze, Łódź 2008, 25-31.
- [6] Kacperski M., *Nanokompozyty polimerowe*, Kompozyty, 7, 2003, 225-232.
- [7] Silvera Batista C.A., Archer L.A., *Polymer/Silica Nanocomposites*, Department of Chemical Engineering, New York 2005.
- [8] Królikowski W., Rosłaniec Z., *Nanokompozyty polimerowe*, Kompozyty, 2004, 3-16.
- [9] Pieczyk L., *Nanokompozyty termoplastyczne*, Tworzywa Sztuczne i Chemia, 2, 2006, 20-25.

ARTUR NIEWIAROWSKI\*

## OPTYMALIZACJA SCHEMATU WAŻENIA TERMINÓW DLA MODELU WEKTOROWEGO

---

## TERM FREQUENCY OPTIMIZATION FOR THE VECTOR SPACE MODEL

### Streszczenie

Artykuł opisuje wybrane metody ważenia terminów dla modelu wektorowego dokumentów tekstowych oraz wybrane metody wyznaczania podobieństw. Dodatkowo, dla zwiększenia dokładności analizy danych, zaimplementowano w procesie ważenia algorytm miary podobieństwa ciągów oparty na odległości Levenshteina. W celu przyspieszenia komparacji danych użyto technologii obliczeń równoległych.

*Słowa kluczowe: data mining, text mining, obliczenia równoległe, grupowanie dokumentów*

### Abstract

Article describes selected terms weighted methods for the vector space model of text documents and selected methods of determine similarities. To improve accuracy of data analysis was implemented algorithm which calculates similarity measure between two strings, based on Levenshtein distance. For accelerate data comparison was used parallel computing technology.

*Keywords: data mining, text mining, parallel computing, aggregate documents*

---

\* Mgr inż. Artur Niewiarowski, Instytut Informatyki, Wydział Fizyki, Matematyki i Informatyki, Politechnika Krakowska.

## 1. Aspekt grupowania dokumentów w analizie poprawności gramatycznej i ortograficznej

Większość mechanizmów analizujących poprawność zdań pod względem ortograficznym czy też gramatycznych opiera się na zaimportowanej wcześniej bazie tekstów – tzw. korpusie. Poprawność, ale również szybkość analizy zależy od doboru właściwych tekstów, jak również metod analizy i modeli reprezentacji danych. Istnieje możliwość stworzenia interfejsu mechanizmu, który umożliwiłby wstępne ustawienie dziedzinowości analizowanych danych. Niestety wielkość zasobów, jak również szczegółowość danych tekstowych w danej dziedzinie może znacząco spowolnić proces mechanizmu. W tym celu zastosowanie mają algorytmy grupowania dokumentów tekstowych (fragmentów tekstów) umożliwiające wstępne oszacowanie (tzn. przyporządkowanie) badanego tekstu do zasobów.

Istnieje wiele metod grupowania dokumentów, do najważniejszych należą metody: płaskie, hierarchiczne, grafowe, oparte na gęstości itd. Metody określają sposób segregacji danych i ich ostateczną reprezentację jako wynik analizy. Dla metody należy określić model danych umożliwiający reprezentację danych tekstowych (zdań oraz całych dokumentów), jak również konkretne operacje oszacowania stopnia relacyjności (podobieństwa) pomiędzy dokumentami. Do najczęściej stosowanych modeli należą: wektorowy, grafowy i przestrzeni metrycznej.

W publikacji przedstawiony zostanie najpopularniejszy model reprezentacji danych, tj. model wektorowy. Komparacja terminów odbywa się z użyciem algorytmu miary podobieństwa ciągów opartego na odległości Levenshteina w celu dokładniejszego oszacowania ich podobieństwa i wyliczeniu odpowiedniej wagi. Wprowadzenie w każdy mechanizm dodatkowych elementów obliczeniowych (w tym przypadku miary podobieństwa ciągów) powoduje obniżenie czasu wykonania obliczeń. Dlatego w publikacji zaprezentowany został dodatkowo algorytm umożliwiający zrównoleglenie analizy dokumentów tekstowych. Optymalizacja procesu ważenia terminów polega na zwiększeniu dokładności oszacowania wag pomiędzy terminami bez użycia dodatkowych słowników (np. wyrazów bliskoznacznych), jak również przyspieszeniu głównego algorytmu komparacji dokumentów poprzez zastosowanie technologii obliczeń równoległych.

## 2. Schematy ważenia w modelu wektorowym

Model wektorowy (ang. *Vector Space Model*) jest najpopularniejszym modelem reprezentacji dokumentów tekstowych. Dokument (fragment dokumentu) jest przedstawiony jako  $n$ -wymiarowy wektor cech:

$$\mathbf{d}_j = (\omega_{j,i}, \omega_{j,i+1}, \dots, \omega_{j,n-1}, \omega_{j,n}), \quad i \in \langle 1, n \rangle \quad (1)$$

gdzie:

- $\mathbf{d}$  – wektor reprezentujący dokument (fragment dokumentu),
- $j$  – identyfikator dokumentu,
- $i$  – liczba naturalna oznaczająca kolejne słowa lub grupy słów określające termin,
- $n$  – liczba terminów w  $j$ -tym dokumencie,
- $\omega_{j,i}$  – cecha, liczba rzeczywista będąca wartością znaczeniową terminu.

Ważenie to proces, który nadaje każdemu terminowi (tj. słowo, grupa słów, ang. *term*) wartość znaczeniową, najczęściej jest nią liczba wystąpień w dokumencie. Tego typu schemat określany jest w języku angielskim jako *term frequency*:  $tf_{t,d}$  (gdzie:  $t$  – termin,  $d$  – dokument). Poważnym problemem tego typu modelu jest brak rozróżniania istotności poszczególnych terminów charakteryzujących zagadnienia (dziedzinę) zawarte w dokumencie. Innym rozwiązaniem jest oszacowanie danego wystąpienia w badanych dokumentach i skorzystanie z odwrotnej częstości dokumentowej (ang. *inversed document frequency*) opisanej poprzez wzór:

$$idf_t = \log \frac{N}{df_t} \quad (2)$$

gdzie:

$N$  – liczba wszystkich badanych dokumentów,

$df_t$  – częstość dokumentowa – określa liczbę dokumentów dla danego wystąpienia terminu.

Ostatecznie, w celu doprecyzowania schematu ważenia terminów, stosuje się następujący wzór, którego wynik jest iloczynem kartezjańskim odwrotnej częstości dokumentowej i częstości wystąpienia terminu [1]<sup>1</sup>:

$$tf - idf_{t,d} = \log \frac{N}{df_t} \cdot tf_{t,d} \quad (3)$$

Wzór (3) nie umożliwia oszacowania podobieństwa, w których liczba dokumentów dla danego wystąpienia terminu jest równa liczbie badanych dokumentów, gdyż logarytm w takim przypadku jest równy 0, co z kolei ma przełożenie na wzory metod bazujących na obliczonych wagach – niedozwolone operacje dzielenia przez 0. Taka sytuacja ma miejsce, gdy np. dokumenty są identyczne. Propozycja modyfikacji wzoru (3) jest następująca:

$$tf - idf_{t,d} = \max\left(\log \frac{N}{df_t}, 0.00\dots01\right) \cdot tf_{t,d} \quad (4)$$

Wprowadzona funkcja zwracająca wartość maksymalną z dwóch argumentów zapobiega otrzymaniu wartości zerowej. Ułamek w drugim argumentcie jest dowolnie mały.

### 3. Metody wyznaczania podobieństwa dla modeli wektorowych

#### 3.1. Współczynniki: Dice i Jaccarda

Oszacowanie wartości podobieństwa dla określonego modelu wektorowego jest odrębnym zagadnieniem. Często do wyznaczenia bliskości pomiędzy wektorami dokumentów danego modelu, stosuje się współczynnik Dice:

$$\text{Dice\_dist}(d_i, d_k) = 2 \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij} d_{kj}}{\sum_{j=1}^n d_{ij}^2 + \sum_{j=1}^n d_{kj}^2} \quad (5)$$

<sup>1</sup> <http://nlp.stanford.edu/IR-book/pdf/06vect.pdf>, 119.

lub uogólniony współczynnik Jaccarda:

$$\text{Jaccard\_dist}(d_i, d_k) = \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij} d_{kj}}{\sum_{j=1}^n d_{ij}^2 + \sum_{j=1}^n d_{kj}^2 - \sum_{j=1}^n d_{ij} d_{kj}} \quad (6)$$

Oba współczynniki umożliwiają obliczenie zgodności pomiędzy cechami wektora.

### 3.2. Miara cosinusa kąta w funkcji podobieństwa modelu wektorowego

Najbardziej powszechną metodą w dziedzinie analizy podobieństwa dokumentów jest odległość cosinusowa [1]<sup>2</sup> (7).

$$\text{Cosine\_dist}(d_i, d_k) = \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij} d_{kj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n d_{ij}^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n d_{kj}^2}} \quad (7)$$

## 4. Implementacja algorytmu odległości Levenshteina w procesie ważenia terminów

### 4.1. Odległość Levenshteina

Odległość Levenshteina umożliwia obliczenie najmniejszej liczby zmian potrzebnych do przeprowadzenia na znakach dwóch porównywanych ciągów, w celu osiągnięcia ich identyczności [4]. Algorytm jest uogólnieniem odległości Hamminga (ang. *Hamming distance*). W przeciwieństwie do odległości Hamminga, odległość Levenshteina umożliwia porównywanie ciągów o różnej długości, co bezpośrednio przekłada się na zastosowanie algorytmu, tj. m.in. w: korekcie pisowni, maszynowym tłumaczeniu tekstów, eksploracji danych tekstowych, a szerzej w mechanizmach wyszukiwarek internetowych, procesorach tekstów itd.

Zasada działania algorytmu polega na porównywaniu znaków mieszczących się na odpowiednich pozycjach w badanych dwóch ciągach, a następnie na tej podstawie uzupełnianiu macierzy o wymiarach adekwatnych do badanych łańcuchów, według poniższego schematu:

$$K = \prod_{x=1}^N \prod_{y=1}^M D(x, y) = \min(D(x-1, y) + 1, D(x, y-1) + 1, D(x-1, y-1) + \beta) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \beta = 0 : a(x) \equiv b(y) \\ \beta = 1 : a(x) \neq b(y) \\ D(x, 0) = x \\ D(0, y) = y \\ D(0, 0) = 0 \end{cases}$$

<sup>2</sup> <http://nlp.stanford.edu/IR-book/pdf/06vect.pdf>, 122.



gdzie:

- $K$  – odległość Levenshteina,
- $\prod_{x=1}^N$  – symbol oznaczający iterację dla  $x = (1, \dots, N)$ ,
- $\mathbf{D}$  – macierz o rozmiarach  $N + 1, M + 1$ , utworzona z dwóch porównywanych ciągów,
- $N, M$  – długości badanych ciągów,
- $D(x, y)$  –  $(x, y)$ -ty element macierzy  $\mathbf{D}$ ,
- $\min$  – funkcja zwracająca wartość najmniejszą z podanych,
- $\beta$  – zmienna przybierająca odpowiednio wartości 0 lub 1,
- $a(x)$  –  $x$ -ty element ciągu znaków  $a$ ,
- $b(y)$  –  $y$ -ty element ciągu znaków  $b$ .

#### 4.2. Implementacja funkcji miary podobieństwa ciągów w metodzie ważenia terminów

Algorytm obliczający wagę terminu zawiera instrukcje porównania terminów. Standardowy mechanizm opisany w publikacjach nie uwzględnia możliwości wystąpienia błędów w porównywanych terminach. Istnieją rozwiązania umożliwiające analizę podobnych wyrazów w oparciu o słowniki wyrazów bliskoznacznych (np. projekt WordNet) [2<sup>3</sup>, 3], jednak słowniki tego typu nie uwzględniają błędów ortograficznych, jak również wszystkich odmian wyrazów, w szczególności w językach innych niż angielski. Konsekwencją może być niedokładna analiza danych tekstowych.

W celu uwzględnienia możliwych błędów i rzadkich odmian wprowadzona została do algorytmu obliczającego wagę terminu, miara podobieństwa ciągów, oparta na odległości Levenshteina. Miara podobieństwa dwóch ciągów  $P$  obliczana jest wg zależności (9):

$$P = 1 - \left( \frac{K}{\max\{N, M\}} \right), \quad \begin{array}{l} K \geq 0, M > 0, N > 0 \\ P \in \langle 0, 1 \rangle \end{array} \quad (9)$$

gdzie:

$\max\{N, M\}$  – wartość będąca maksymalną liczbą kroków zmieniających jeden tekst w drugi (przypadek, w którym ciągi są całkowicie różne).

Formuła (9) umożliwia otrzymanie miary podobieństwa pomiędzy dwoma terminami. Wynik  $P = 1$  oznacza, że dwa porównywane ciągi są identyczne, wynik  $P = 0$  oznacza, że ciągi są całkowicie różne. Wartości pośrednie określają stopień podobieństwa.

Poniżej znajdują się pseudokody przedstawiające metodę ważenia terminów z zaimplementowaną miarą podobieństwa ciągów:

```

1 for (c=0; c < Terms.count; c++) {
2   df=0;
3
4   for (j=0; j < d.count; j++) {
5     if (f_exists(d[j].terms, Terms[c])) df++;
6   }
7
8   for (j=0; j < d.count; j++)
9     X[j][c] = f_tf_idf(N, df, f_tf(d[j].terms, Terms[c]));
10}

```

<sup>3</sup> <http://webdocs.cs.ualberta.ca/~lindek/papers/acl98.pdf>.

gdzie:

- $N$  – liczba badanych dokumentów,
- $df$  – liczba dokumentów, w których występuje dany termin (ang. *document frequency*),
- $Terms$  – tablica unikatowych terminów wchodzących w skład porównywanych wektorów dokumentów,
- $d$  – tablica dokumentów, o strukturze przechowującej informacje o numerach dokumentów identyfikowanych przez zmienną  $j$  oraz występujących w nich terminach,
- $X$  – tablica dwuwymiarowa reprezentująca macierz relacji terminów i dokumentów,
- $f\_exists$  – funkcja sprawdzająca, czy dany termin występuje w tablicy  $d$ . Zwraca wartości boolowskie,
- $f\_tf$  – funkcja zwracająca liczbę terminów występujących w danym dokumencie (ang. *term frequency*),
- $f\_tf\_idf$  – funkcja zwracająca wagę terminu, tj. wartość zgodnie ze wzorem (5).

Fragment pseudokodu programu dla funkcji  $f\_tf$ :

```
1 for (i=0; i < d[j].count; i++){
2   if (f_sim_meas(d[j].terms[i], Terms[c]) >= P) cnt++;}
3   // zamiast d[j].terms[i] == Terms[c]
```

gdzie:

$f\_sim\_meas$  – funkcja zwracająca wartości zgodne ze wzorem (9).

W powyższym kodzie standardowe porównanie terminów poprzez znaki równości zostało zastąpione funkcją zwracającą miarę podobieństwa pomiędzy terminami. Zmienna  $P$  w kodzie jest traktowana jako jeden z parametrów analizy danych. Adekwatna sytuacja ma miejsce w kodzie funkcji  $exists$ .

Fragment pseudokodu programu dla funkcji  $f\_exists$ :

```
1 for (i=0; i < d[j].count; i++){
2   if (f_sim_meas(d[j].terms[i], Terms[c]) >= P)
3     return true;
4 }
5 return false;
```

Fragment pseudokodu funkcji  $f\_tf\_idf$ :

```
1 return Math.Max(Math.Log(N / df), 0.0000001) * tf;
```

Wprowadzenie w kodzie funkcji zwracającej wartość maksymalną umożliwi uniknięcie niedozwolonej operacji dzielenia przez zero w funkcji obliczającej odległość cosinusa (7).

### 4.3. Implementacja mechanizmu obliczeń równoległych w funkcji odległości cosinusa

Użycie algorytmu miary podobieństwa ciągów opartego na odległości Levenshteina pociąga za sobą podwyższenie złożoności obliczeniowej i czasowej. Sposobem na uniknięcie utraty wydajności całego mechanizmu jest zastosowanie technologii obliczeń równoległych. Ze względu na niezależność zdarzeń porównania dokumentów istnieje możliwość przyspieszenia analizy danych poprzez rozłożenie obliczeń na wiele rdzeni procesora(ów).

Poniżej znajduje się pseudokod operacji zrównoleglenia komparacji dokumentów funkcją *cosine\_dist*. Algorytm odpowiednio dzieli zdarzenia, jakimi są porównania dwóch dokumentów adekwatnie do liczby rdzeni.

```

1 Parallel.For(0, num_of_proc, sub(nproc) {
2     int int_from, int_to;
3     int_from = nproc * Int(N / num_of_proc) + 1;
4     int_to = (int_from - 1) + Int(N / num_of_proc);
5
6     if (int_to + Int(N / num_of_proc) > N)
7         {int_to = N;}
8
9     for (j_x = int_from ; j_x <= int_to ; j_x++){
10        for (j_y = j_x + 1 ; j_y <= N ; j_y++){
11
12            results[j_y][j_x] = cosine_dist(d, j_y, j_x, Terms.Count);}}
13    End Sub } );

```

gdzie:

- Parallel.For – pętla zrównoleglająca (oparta o rozwiązanie Microsoft.NET [5]), pierwszy parametr jest wartością początkową wskaźnika pętli zrównoleglającej, parametr drugi jest liczbą iteracji kierowanych na poszczególne rdzenie, parametr trzeci jest zestawem procedur,
- num\_of\_proc* – liczba rdzeni (procesorów),
- N* – liczba badanych dokumentów,
- results* – tablica wyników,
- nproc* – numer iteracji,
- Int – funkcja zwracająca wartość całkowitą z liczby stałoprzecinkowej,
- j\_x, j\_y* – zmienne zawierające numery dokumentów do porównania,
- cosine\_dist* – funkcja obliczająca odległość cosinusa według wzoru (7).

Liczbę wszystkich porównań dokumentów, wymaganą dla każdego modelu metody grupowania, można obliczyć ze wzoru na liczbę kombinacji bez powtórzeń:

$$C_N^2 = \binom{N}{2} = \frac{N!}{2!(N-2)!} \quad (10)$$

gdzie:

- 2 – liczba zestawianych dokumentów w jednym porównaniu,
- N* – liczba porównywanych dokumentów.

Jak łatwo obliczyć, już dla zaledwie 150 dokumentów liczba porównań wynosi 11,175. Jeżeli przyjąć, że porównania wykonano iteracyjnie bez zrównoleglenia i że jedno porównanie teoretycznie trwa 1 sekundę, to ogólny czas zestawienia wynosi: 3,10 godz.

$$\sum_{nproc=0}^{num\_of\_proc-1} \sum_{c=int\_from}^{int\_to} N - c \quad (11)$$

Wzór (11) umożliwia obliczenie liczby porównań dla danego rdzenia ( $nproc$ ) przy znanej liczbie rdzeni ( $num\_of\_proc$ ) i liczbie dokumentów ( $N$ ). Jeżeli obliczenia byłyby wykonane metodą przedstawioną w pseudokodzie, to w tym przypadku całkowity czas analizy byłby równy najdłuższemu czasowi porównania, czyli 4847 s. (tabela 1). Co daje przyspieszenie o ok. 1,75 godz., czyli obliczenia wykonane zostałyby prawie dwukrotnie szybciej.

Tabela 1

#### Przykład porównania 150 dokumentów na 4-rdzeniowym procesorze

| Rdzeń: | Zakres dokumentów | Liczba porównań dla zakresu | Liczba porównań ogółem |
|--------|-------------------|-----------------------------|------------------------|
| 0      | 1–37              | 4847                        | 4847                   |
| 1      | 38–74             | 3478                        | 8325                   |
| 2      | 75–111            | 2109                        | 10434                  |
| 3      | 112–150           | 741                         | 11175                  |

### 5. Test prezentowanych metod i analiza wyników działania algorytmów

W rozdziale przedstawione zostały wyniki testów analizy danych tekstowych z użyciem zaprezentowanych metod na bazie opracowanych symulacji obliczeń.

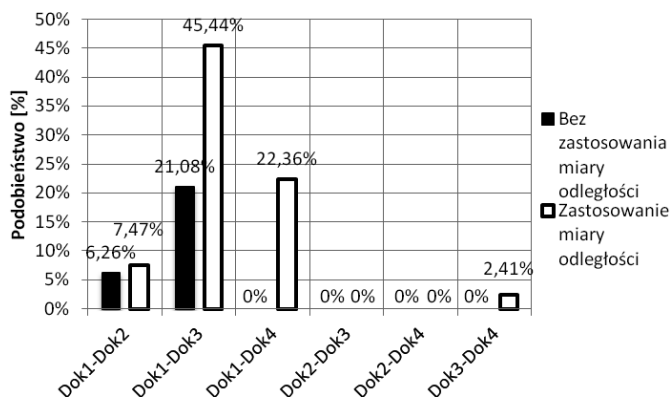
#### 5.1. Implementacja algorytmu miary podobieństwa ciągów

Implementacja algorytmu miary podobieństwa ciągów umożliwia dokładniejsze porównanie dwóch dokumentów tekstowych względem siebie. W celach analizy porównane zostały cztery krótkie zdania (tabela 2) skonstruowane tak aby zawierały wyrazy podobne.

Tabela 2

#### Zawartość dokumentów poddanych analizie

| Nazwa dokumentu | Treść dokumentu   |
|-----------------|---|
| Dokument 1      | Odległość Levenshteina w analizie danych tekstowych                   |
| Dokument 2      | Odległość Hamminga i jej zastosowanie                                 |
| Dokument 3      | Analiza danych tekstowych   |
| Dokument 4      | Prezentowany algorytm (autor: V. Levenshtein) analizuje dane tekstowe |



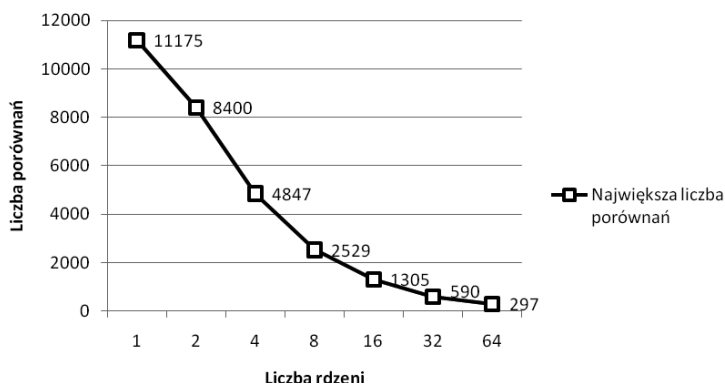
Rys. 1. Wykres przedstawiający wyniki analizy podobieństwa dokumentów (tabela 2)

Fig. 1. Chart describes results of similarities between documents (table 2)

Wykres przedstawia wyniki porównania ciągów bez i z użyciem algorytmu miary podobieństwa ciągów. We wszystkich porównaniach widać znaczny wzrost podobieństwa z użyciem omawianego algorytmu. W ramach testów parametr klasyfikujący ciągi jako podobne wyniósł  $P \geq 0,75$  (9).

## 5.2. Implementacja algorytmu zrównoleglenia operacji porównania dokumentów

Wyniki symulacji analizy dokumentów na wielordzeniowych komputerach przedstawiają wykresy poniżej.

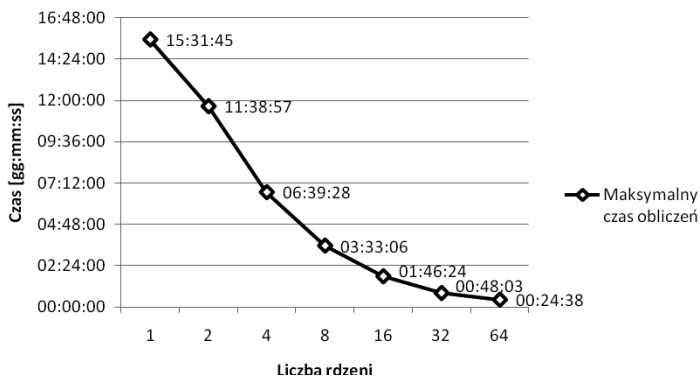


Rys. 2. Wykres zależności liczby rdzeni do maksymalnej liczby porównań dla 150 dokumentów

Fig. 2. Relationship between number of cores and maximum number of comparisons for 150 documents

Wykres na rysunku 2 przedstawia tendencję spadkową największej liczby porównań (tj. dla pierwszego rdzenia) do liczby rdzeni biorących udział w obliczeniach, według modelu zaprezentowanego w rozdziale 4.3.

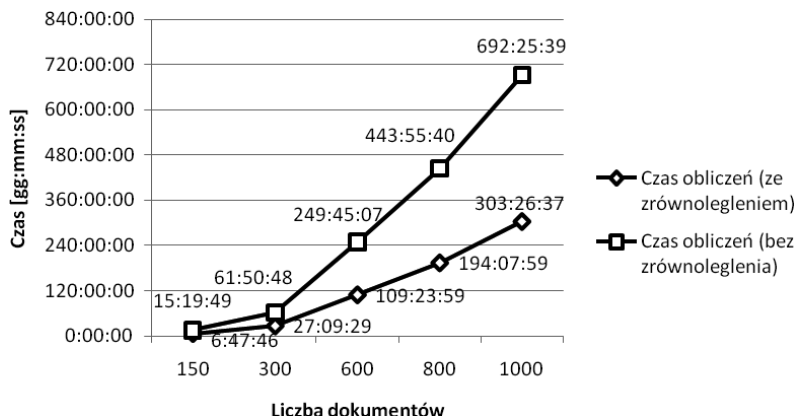
Poniżej przedstawiono wykresy obrazujące czas analizy dużych dokumentów tekstowych o podobnych rozmiarach. Czas porównania dwóch dokumentów w symulacji jest wartością losową z przedziału od 0,5 do 10 sekund.



Rys. 3. Wykres zależności liczby rdzeni do całkowitego czasu obliczeń

Fig. 3. Relationship between number of cores and total computation time

Wykres na rysunku 3 przedstawia tendencję spadkową czasu obliczeń (składających się z komparacji dwóch dokumentów) zbioru 150 dokumentów do liczby rdzeni.



Rys. 4. Czas porównania różnej liczby dokumentów na 4-rdzeniowym procesorze

Fig. 4. Computation time of comparison the different number of documents for 4-core processor

Wykres na rysunku 4 przedstawia różnicę w czasach analizy zmiennej liczby dokumentów na komputerze 4-rdzeniowym.

Zaprezentowane symulacje ukazują istotny wpływ użycia technologii obliczeń równoległych w analizie danych tekstowych na szybkość obliczeń. Zastosowanie opisanej metody podziału znacząco przyspiesza całość procesu obliczeniowego.

## 6. Podsumowanie

Przedstawiony w publikacji mechanizm analizy danych tekstowych oparty na mierze podobieństwa ciągów umożliwia komparację terminów opisanymi metodami w sposób bardziej precyzyjny, z uwzględnieniem odmian i błędów ortograficznych.

Implementacja algorytmu odległości Levenshteina pociąga za sobą podwyższenie złożoności obliczeniowej i czasowej. Rekompensatą za obniżenie wydajności mechanizmu jest przedstawiony sposób na zrównoleglenie analizy dokumentów. Użycie technologii obliczeń równoległych wyraźnie przyspiesza proces oszacowania relacyjności pomiędzy poszczególnymi dokumentami, co dla dużego zbioru danych jest bardzo istotne.

Zastosowanie zarówno algorytmu miary podobieństwa ciągów bazującego na odległości Levenshteina, jak również zrównoleglenie obliczeń znacząco optymalizuje całość procesu obliczeniowego.

## Literatura

- [1] Manning C.D., Raghavan P., Schütze H., *Introduction to Information Retrieval*, Cambridge University Press, 2007.
- [2] Lin D., *Automatic retrieval and clustering of similar words*, COLING 1998, ACL, 1998, 768-774.
- [3] Piasecki M., Broda B., *Semantic similarity measure of Polish nouns based on linguistic features*, Business Information Systems 10<sup>th</sup> International Conference, Poznań, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4439, Springer, 2007.
- [4] Левенштейн В.И., *Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов*. Доклады Академии Наук СССР 163 (4), 845-848.
- [5] Campbell C., Johnson R., Miller A., Toub S., *Parallel Programming with Microsoft .NET. Design Patterns for Decomposition and Coordination on Multicore Architectures*, Microsoft Press, 2010.





KSENIA OSTROWSKA, DANUTA SZEWCZYK, JERZY ŚLADEK\*

## WZORCOWANIE SYSTEMÓW OPTYCZNYCH ZGODNIE Z NORMAMI ISO I ZALECENIAMI VDI/VDE

### CALIBRATION OF OPTICAL SYSTEMS ACCORDING TO ISO STANDARDS AND VDI/VDE RECOMMENDATIONS

#### Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono wytyczne odnośnie do wzorcowania wybranych systemów optycznych zgodnie z normą ISO 10360 oraz zaleceniami niemieckiego PTB VDI/VDE 2634. Pokazano różnice w podejściu obu dokumentów do zagadnienia wzorcowania. Ukazano ważną rolę, jaką przy opracowywaniu wyników przy pomiarach geometrycznych odgrywają używane programy do analizy powierzchni, zwracając uwagę na różnice w stosowanych algorytmach. Autorzy podkreślili znaczenie możliwości programów jako czynnika kluczowego przy opracowywaniu danych w odniesieniu do metod wzorcowań. Badania przeprowadzono na Współrzędnościowym Ramieniu Pomiarowym wyposażonym w głowicę optyczną.

*Słowa kluczowe: system optyczny, normy ISO 10360, zalecenia VDI/VDE, metody wzorcowania, oprogramowanie, algorytm*

#### Abstract

The article presents guidelines for the calibration of given optical systems based on the standard from ISO 10360 series and recommendations of German PTB VDI/VDE 2634. Differences in the approach of both documents to the calibration issue have been shown. An important role of used surface analysis softwares in the process of developing the results of geometric measurements have been presented, noting the differences in the used algorithms. Authors stressed the importance of software capabilities as a key factor in the data development in relation to the calibration methods. The researches were done on Coordinate Measuring Arm equipped with an optical probe.

*Keywords: optical system, ISO 10360 standards, VDI/VDE recommendations, calibration methods, software, algorithm*

\* Dr inż. Ksenia Ostrowska, mgr inż. Danuta Szewczyk, dr hab. inż. Jerzy Śladek, prof PK, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## Oznaczenia

|             |   |
|-------------|---|
| $\bar{S}_r$ | – średnica                              |
| $L_0$       | – przekątna                             |
| $\Delta l$  | – błąd odległości pomiędzy środkami kul |
| $l_m$       | – zmierzona wartość długości            |
| $l_k$       | – wywzorcowana wartość długości         |
| $L_p$       | – wymiary wzorca                        |
| $D_p$       | – średnica kul                          |
| $F_x^p$     | – błąd pomiaru płaszczyzny              |
| $N$         | – odległość normalna                    |

## 1. Wstęp

Wraz z rozwojem metod pomiarowych i kontroli dokonywanej przez urządzenia pomiarowe coraz większe wymagania zaczęto stawiać metrologii współrzędnościowej, które dotyczyły dokładności wykonywanych elementów, czasu pomiaru oraz automatyzacji. Spowodowało to dążenie do lepszego wykorzystania aktualnej technologii, jak również rozwijania się nowej. Współrzędnościowa technika pomiarów wielkości geometrycznych przeżywa obecnie dynamiczny rozwój dzięki możliwości automatyzacji pomiarów, integracji z systemami CAD/CAM oraz zastosowania systemów optycznych, które znacznie skracają czas pomiaru [1–4].

Rozwojowi wszelkich gałęzi przemysłu towarzyszą rosnące wymagania dotyczące jakości wyrobów, a wraz z nimi wyzwania dla metrologów w zakresie wyznaczania niepewności pomiaru, wzorcowania i nadzorowania systemów współrzędnościowych. Źródłem informacji w tym zakresie są normy PN-EN ISO 9001: 2009 oraz PN-EN ISO 10012-1 poruszające tematykę regularnego wzorcowania i nadzorowania sprzętu pomiarowego przez akredytowane laboratoria. Dla użytkowników współrzędnościowych maszyn pomiarowych zadaniem bardzo istotnym jest utrzymanie granicznych błędów dopuszczalnych na stałym poziomie. Kluczowe okazują się być w tym zakresie normy z serii ISO 10360. Istotna w świetle zagadnień metrologicznych jest świadomość występowania dwóch ściśle ze sobą związanych, ale odmiennych problemów naukowych: dokładności współrzędnościowych systemów pomiarowych oraz dokładności pomiarów współrzędnościowych. W niniejszym artykule omówiono pierwszy z nich ściśle związany z zadaniem wzorcowania [5–9].

W metrologii współrzędnościowej systemy optyczne znajdują się na coraz ważniejszej pozycji przez wzgląd na rosnący obszar zastosowań. Współrzędnościowe systemy optyczne to połączenie techniki współrzędnościowej (umożliwiającej dowolne ustawienie mierzonego elementu w obszarze pomiarowym) z bezstykowym sposobem pomiarów optycznych, który zapewnia skrócony czas pomiarów czy możliwości bieżącej wizualizacji procesów produkcyjnych. Wynikiem tego zestawienia jest grupa bardzo efektywnych systemów stanowiących odpowiedź na wymagania dynamicznie rozwijającego się rynku. Należą do nich technologie obrazowania, oparte na skanowaniu powierzchni i całych obiektów z wykorzystaniem techniki optycznej i tomografii komputerowej. Obecnie bez udziału współrzędnościowej techniki pomiarowej trudno wyobrazić sobie zagadnienie szybkiego prototypowania, inżynierii rekonstrukcyjnej, wzornictwa przemysłowego, techniki biomedycznej czy ochrony zabytków. Ciągły rozwój metrologii współrzędnościowej skutkuje nowymi technologiami wzorcowania oraz metodami oceny dokładności pomiaru. W dziedzinie pomiarów optycznych można

wyróżnić systemy działające na zasadzie: światła strukturalnego, fotogrametrii realizującej triangulację laserową, na pomiarze czasu powrotu wiązki detekcyjnej (TOF– *Time of Flight*) oraz systemy tomografii komputerowej (CT) lub rezonansu magnetycznego (RM) [1, 8–14].

W Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej prowadzone są prace nad poprawą dokładności systemów optycznych, co zaowocowało współpracą z Instytutem Mechatroniki Politechniki Warszawskiej i projektem Nr T10C 010 29 pt: „Opto-numeryczny system do pomiaru elementów geometrycznych zintegrowany z Współrzędnościową Maszyną Pomiarową” [P1]. Równocześnie prowadzone są prace na czterech systemach optycznych, tj. Współrzędnościowe Ramie Pomiarowe (WRP) z głowicą optyczną R-Scan (triangulacja laserowa) współpracuje z oprogramowaniem 3D Reshaper, Systemem OGX działającym na zasadzie światła strukturalnego z oprogramowaniem Mesh 3D, Laser Traker (LT) działającym za zasadzie czasu powrotu wiązki z oprogramowaniem PC Dmis, jak również systemem fotogrametrycznym współpracującym z oprogramowaniem PhotoModeler 5.0 [15–20] (rys. 1).



Rys. 1. a) Ramie pomiarowe Omega 2025 firmy Romer wyposażone w głowicę skanującą R-SCAN, b) Laser Tracer, c) system fotogrametrii, d) system działający na zasadzie światła strukturalnego

Fig. 1. a) Measuring Arm Omega 2025 of Romer Company equipped with scanning probe R-SCAN, b) Laser Tracer, c) photogrammetry system, d) system using the principle of structured light

Obecnie istnieją dwa dokumenty przedstawiające wytyczne co do wzorcowania wyżej wymienionych systemów, tj. ISO 10360-8, oraz zalecenia niemieckiego PTB VDI/VDE 2634. W niniejszym artykule przedstawiono różnice w podejściu obu dokumentów do zagadnienia wzorcowania, jak również pokazano jak wielką rolę przy opracowywaniu wyników pomiarów geometrycznych odgrywają użyte programy do analizy powierzchni, zwracając uwagę na różnice w użytych algorytmach. Pokazano jak dużo może zależeć nie od metody wzorcowania, lecz od możliwości oprogramowań.

## 2. Metody wzorcowania systemów optycznych

### 2.1. Zalecenia VDI/VDE [N1]

Zalecenia niemieckiego PTB dla sprawdzania systemów optycznych VDI/VDE 2634 „Systeme-mit-flaechenhafter-Antastung” opisują metody i wzorce do testowania optycznych systemów pomiarowych 3D. Metody te obejmują: akceptację optycznych systemów pomiarowych 3D oraz ich powtórny weryfikację.

Wymagania w stosunku do wzorców służących do akceptacji są ściśle sprecyzowane i zmieniają się wraz z zakresem pomiarowym systemu. Wzorcem jest tu liniowy, dwuwymiarowy lub trójwymiarowy układ cech, który ma zostać zmierzony. Powinny one być skalibrowane ze względu na ich wymiary oraz formę. Bardzo ważne jest, aby wzorcowania systemów optycznych dokonywać w określonych warunkach pracy (np. temperatura, drgania mechaniczne czy warunki oświetleniowe) oraz trybach pracy (np. rodzaj i intensywność oświetlenia czy przestrzeń pomiarowa). Powinny być one tak zaprojektowane, aby nie wywierały wpływu na określone parametry jakościowe (tj. **błąd układu głowicy optycznej, błąd wskazania na długości, błąd płaskości**) (rys. 2).



Rys. 2. Wzorce do testów akceptacji dla: a) błędu układu głowicy optycznej, b) błędu wskazania na długości, c) błędu płaskości

Fig. 2. Standards for acceptance tests for: a) probing error, b) sphere-spacing error, c) flatness measurement error

Przeprowadzenie **testu akceptacyjnego** poprzedza odpowiednie, określone przygotowanie i wykorzystanie badanego optycznego systemu pomiarowego zgodnie z określonymi warunkami operacyjnymi dla celów akceptacyjnych. Należy wówczas uwzględnić niezbędny czas na rozgrzanie systemu, sprawdzić stabilność mocowania, przeznaczyć wystarczająco długi okres na aklimatyzację wzorców, jak również uwzględnić ich refleksyjność.

Pierwszy ze wskazanych parametrów jakościowych, a więc **błąd układu głowicy optycznej**, opisuje charakterystyczny błąd w optycznych systemach pomiarowych 3D opartych na skanowaniu powierzchni w małym zakresie pomiarowym. Aby go wyznaczyć, należy określić tryb pracy systemu. Zgodnie z definicją jest to: „odległość między środkiem sfery wyznaczonej z zastosowaniem kryterium Gaussa (metoda najmniejszych kwadratów) – będącej elementem skojarzonym, opartym na skończonej liczbie punktów pomiarowych skorygowanych, na kulistym wzorcu materialnym wymiaru – a punktem pomiarowym skorygowanym na tym samym kulistym wzorcu materialnym wymiaru” [N1].

Jako wzorec stosuje się kule z ceramiki, stali lub innych odpowiednio rozpraszających światło materiałów o średnicy:

$$\text{śr} = (0,1 \dots 0,2) \cdot L_0 \quad (1)$$

gdzie:

$L_0$  – przekątna najmniejszego prostokątnego równoległoscianu obejmującego przestrzeń pomiarową.

Istotne jest, aby błąd kształtu kuli był mniejszy niż 1/5 charakterystyki wymiarowej wykorzystywanego wzorca kuli. Procedura polega na pomiarze kuli w co najmniej 10 ustawieniach w całej przestrzeni pomiarowej najlepiej w taki sposób, aby rozrzut punktów był w całej przestrzeni pomiarowej.

W kolejnym etapie przeprowadza się kalkulację wyników przez tworzenie kul we wszystkich pozycjach wzorca za pomocą metody najlepszego dopasowania oraz przez obliczenie

odchyłki od promienia kuli dla zmierzonych punktów z każdej pozycji. Dla każdej z pozycji kuli obliczana jest wartość odchyłki promienia kuli. Interpretacja wyników polega na uznaniu, że badany parametr jakościowy jest poprawny, jeśli błąd w żadnym punkcie nie przekroczy maksymalnej dopuszczalnej wartości.

Kolejny parametr jakościowy **błąd wskazania na długości** służy do weryfikacji zdolności systemu do odtwarzania długości. Zgodnie z definicją jest to: „różnica pomiędzy wartością zmierzoną, a wykalibrowaną odległości pomiędzy kulami”.

$$\Delta l = l_m - l_k \quad (2)$$

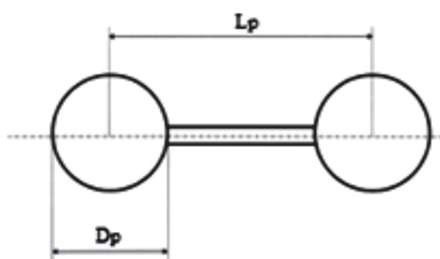
gdzie:

$\Delta l$  – błąd odległości pomiędzy środkami kul,

$l_m$  – zmierzona wartość długości,

$l_k$  – wywzorcowana wartość długości.

Do zbadania błędu odległości między środkami kul stosuje się wzorec, na którym umieszczone są dwie kule zrobione ze stali, ceramiki lub innych, odpowiednich materiałów. Wymiary wzorców dla konkretnych przestrzeni pomiarowych wynikają z poniższych zależności:



Rys. 3. Schemat wzorca

Fig. 3. Schematic of artefact

$$L_p \geq 0,3 \cdot L_0 \quad (3)$$

$$D_p = (0,1 \dots 0,2) \cdot L_0 \quad (4)$$

gdzie:

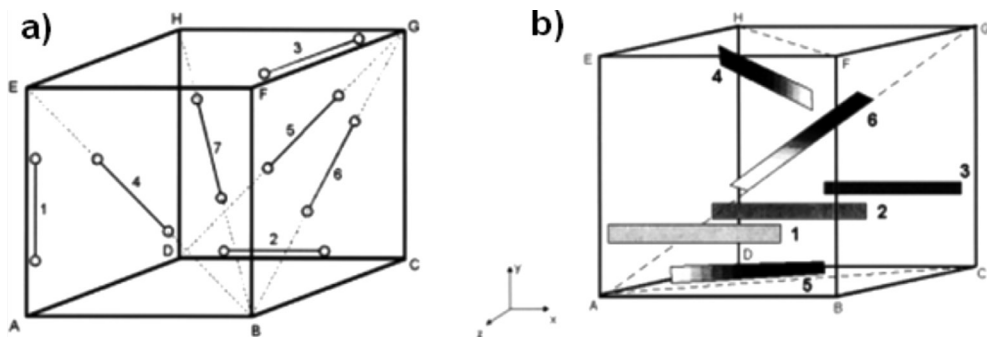
$L_0$  – przekątna sześcianu opisującego zakres pomiarowy,

$L_p$  – wymiary wzorca,

$D_p$  – średnica kul.

Niepewności, jak w przypadku pierwszego parametru, powinny być znane i nie wykraczać poza 1/5 sprawdzanego parametru jakościowego.

W celu zbadania błędu wskazania na długości wykonuje się pomiar wzorca w siedmiu ustawieniach. Na rys. 3a przedstawiono rekomendowane ustawienie. Wzorec powinien być ustawiony równoległe do poszczególnych osi (ust. 1, 2 i 3), zgodnie z przekątnymi płaszczyzn tworzących sześcian (ust. 4, 5 i 6), wzdłuż jednej z przekątnych sześcianu tworzącego przestrzeń pomiarową (ust. 7). Podobnie jak we wcześniejszym przykładzie tworzy się kule (zgodnie z metodą najmniejszych kwadratów). Do wyznaczania parametru odległości brane są środki kul. Będzie on zgodny (dopuszczalny), jeżeli żaden wynik nie wyjdzie poza zakres maksymalnego błędu SD.



Rys. 4. a) rekomendowane ustawienie przy wyznaczaniu błędu odległości między środkami kul; b) rekomendowane ustawienie przy wyznaczaniu błędu płaskości

Fig. 4. a) recommended arrangement of artefacts for determination of the sphere-spacing error; b) Recommended arrangement of artefacts for determination of the flatness measurement error

Ostatni (trzeci) parametr jakościowy w tych zaleceniach dotyczy weryfikacji **błędu płaskości**, definiowany jako „zakres odległości punktów zmierzonych od płaszczyzny skonstruowanej według metody najmniejszych kwadratów przez najlepsze dopasowanie.” Wykorzystuje się tu wzorce w postaci prostopadłościanów ze stali, ceramiki, aluminium lub innego materiału o niskiej refleksyjności, których szerokości nie mogą być mniejsze od 50 mm, a długości od  $0,5 \cdot L_0$ . Błąd płaskości wzorca nie powinien być większy od  $1/5$  mierzonej charakterystyki. W celu wyznaczenia błędu płaskości należy wykonać pomiar w min. sześciu ustawieniach. Na rys. 3b zostało przedstawione rekomendowane ustawienie: równoległe do płaszczyzny XY, w trzech odległościach (ust. 1, 2 i 3), zgodnie z przekątnymi podstaw prostopadłościanu wyznaczającego przestrzeń pomiarową (ust. 4 i 5), wzdłuż przekątnej prostopadłościanu wyznaczającego przestrzeń pomiarową (ust. 6). Odległość punktów pomiarowych od płaszczyzny wyznaczonej za pomocą najlepszego dopasowania będzie stanowić błąd płaskości  $R_E$ . Zgodność zostaje stwierdzona w przypadku braku przekroczenia maksymalnego błędu.

Zadanie **ponownej weryfikacji** polega na powtórnym jej przeprowadzaniu w celu zapewnienia odpowiedniej jakości systemu optycznego. Wielokrotna weryfikacja pozwala ocenić trend zmian charakterystyk systemu. Niemniej istotne jest zapewnienie bardzo zbliżonych warunków i trybów pracy podczas każdego z pomiarów.

## 2.2. Norma ISO 10360 część 8 [N2]

Zadaniem ISO jest ustanowienie norm we wszelkich dziedzinach życia, a prace nad rozszerzeniem obszaru norm nieustannie trwają. Skutkiem tego działania jest tegoroczna część 8 normy ISO 10360 (Geometryczna specyfikacja produktu (GPS) – Testy akceptacji i weryfikacji dla współrzędnościowej maszyny pomiarowej (WMP) dedykowana WMP z optycznymi głowicami pomiarowymi).

W przypadku ISO 10360-8 prace poczynił Komitet Techniczny ISO/TC 213. Część ISO 10360-8 uważa się za ogólną normę z zakresu GPS (ISO/TR 14638 [N3]). Odpowiednikiem ISO 10360-8 dla systemów stykowych jest część druga niniejszej normy, a więc ISO 10360-2. Metodologia przeprowadzania testów jest w przypadku wskazanych części normy analogiczna.



Dwa podstawowe cele przeprowadzania testów wg. ISO 10360-8 [N2] to:

- 1) zbadanie **błędu wskaźnika skalibrowanego wzorca długości** za pomocą optycznej głowicy pomiarowej oraz
- 2) zbadanie **błędów w układzie optycznej głowicy pomiarowej**.

Testy akceptacji i ponownej weryfikacji podane w tej części ISO 10360 mają zastosowanie jedynie do WMP z optycznymi głowicami pomiarowymi o konwencjonalnej budowie.

Wzorcowanie optycznych systemów pomiarowych 3D zgodnie z normą obejmuje:

- wyznaczenie błędu układu głowicy optycznej – *probing form error*  $P_{F,X}$
- wyznaczenie błędu układu głowicy optycznej – *probing dispersion value*  $P_{95\%,X}$
- wyznaczenie błędu układu głowicy optycznej – *probing size error*  $P_{S,X}$
- wyznaczenie błędu układu głowicy optycznej – *probing size error All*  $P_{S-ALL,X}$
- wyznaczenie błędu wskazania na długości – *length measurement error*  $E_{O,X}$

Następnie porównuje się uzyskane wartości błędów z maksymalnymi dopuszczalnymi wartościami. Jeżeli ich wartości są mniejsze, to dokładność uznaje się za potwierdzoną. W aneksie normy opisane są dodatkowe testy, które są zalecane, tj.: **wyznaczenie błędu płaskości, test odwzorowania głębokości, test odwzorowania nachylenia krawędzi, test odwzorowania kształtów falistych**. Kule stosowane przy pomiarach błędów układu głowicy optycznej muszą być wykonane ze stali, ceramiki lub materiału nierefleksyjnego, a ich średnice powinny znajdować się w zakresie:

$$\text{śr} = (0,1 \dots 0,2) \cdot L_0 \quad (5)$$

gdzie:

$L_0$  – przekątna najmniejszego prostokątnego równoległociąnu obejmującego przestrzeń pomiarową.

Istotne jest, aby błąd kuli był mniejszy niż 1/5 z charakterystyki wymiarowej wykorzystanego wzorca kuli, a sama kula posiadała aktualne świadectwo kalibracji.

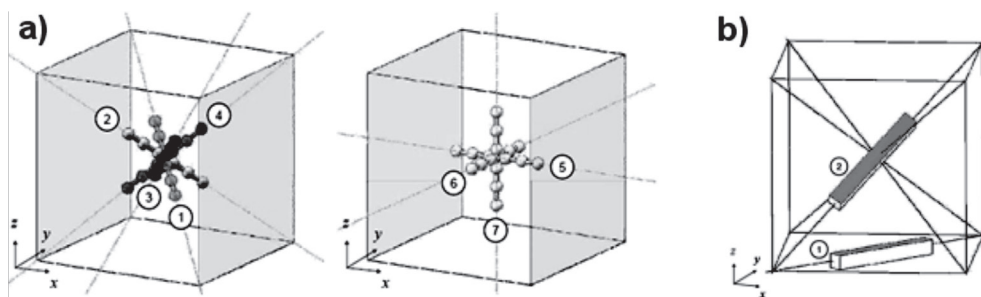
Do weryfikacji parametru płaskości stosuje się natomiast wzorec materialny płaskości, którym jest prostopadłościąn ze stali, ceramiki, aluminium lub materiału o niskiej refleksyjności o szerokości nie przekraczającej 50 mm, natomiast długości nie mniejszej niż  $0,5 \cdot L_0$ . Błąd płaskości nie powinien być większy niż 1/5 mierzonej charakterystyki, a wzorec powinien posiadać aktualne świadectwo kalibracji.

Do wyznaczania błędu wskazania na długości stosuje się materialny wzorec długości, na którym umieszczone są kule zrobione ze stali, ceramiki lub innych odpowiednich materiałów. Powierzchnia kul powinna rozpraszać światło. Do weryfikacji tego parametru stosuje się wzorec stopniowy typu Ball Bar, który powinien pokrywać co najmniej 66% przestrzeni pomiarowej.

W przypadku wyznaczenia błędu **układu głowicy optycznej – probing form error**  $P_{F,X}$  należy wykonać pomiar kuli w jednym ustawieniu. Aby wykonać obliczenia należy podzielić punkty zebrane na kuli na 25 obszarów, a następnie zredukować każdy obszar do punktu reprezentatywnego. Metodą najmniejszych kwadratów z tak uzyskanych 25 punktów należy obliczyć promienie kuli. Różnica promieni uzyskanych jest błędem  $P_{F,X}$ . Przy wyznaczeniu błędu **układu głowicy optycznej – probing dispersion value**  $P_{95\%,X}$  postępuje się adekwatnie jak we wcześniejszym pomiarze. Następnie należy znaleźć zakres zmienności promieni mieszczących się w 95% wynikach. Przy wyznaczeniu błędu **układu głowicy optycznej – probing size error**  $P_{S,X}$  metodą najmniejszych kwadratów z 25 punktów oblicza się średnicę kuli. Różnica średnicy uzyskanej do średnicy nominalnej jest błędem  $P_{S,X}$ . Przy wyznaczeniu

błądu **układu głowicy optycznej – probing size error**  $All P_{S-ALL, X}$  metodą najmniejszych kwadratów ze wszystkich punktów oblicza się średnicę kuli. Różnica średnicy uzyskanej do średnicy wyworcowanej jest błędem  $P_{S-ALL, X}$

Przy wzorcowaniu **błądu pomiaru długości**  $E_{O, X, MPE}$  użytkownik może wybrać siedem różnych miejsc oraz kierunków dla pięciu skalibrowanych długości testowych w ramach ograniczeń określonych przez producenta. Zalecane jest rozmieszczenie jak na rys. 5a. Należy umieścić pięć różnych długości testowych w siedmiu różnych miejscach, kierunkach lub obydwu w miejscu pomiaru WMP z optycznymi głowicami pomiarowymi. Każda z długości testowych mierzona jest trzy razy, w sumie 105 pomiarów. Zalecane umiejscowienie to trzy pozycje wzdłuż osi systemu koordynacji oraz cztery w pozycjach po przekątnej [N2].



Rys. 5. Zalecane umiejscowienie wzorców przy badaniu: a) błędu pomiaru długości, b) błędu płaskości

Fig. 5. Recommended positions of material standards in the assessment of: a) length measurement error) b) flat form measurement error)

W normie ISO 10360-8 dodatkowo znajdują się testy odwzorowania powierzchni, które mówią nam o tym, jak dany system radzi sobie z powierzchniami bardziej skomplikowanymi.

Przy wzorcowaniu **błądu płaskości** użytkownik powinien umieścić urządzenie na płycie wzorcowej  $x, y$  jak najbliżej wzdłuż przekątnej w przestrzeni pomiarowej WMP. Zalecane jest umieszczenie jak na rysunku 5b. Pomiar wzorca płaskości przeprowadza się w dwóch pozycjach: jedna wzdłuż linii przekątnej na płycie wzorcowej  $x, y$ , druga w pozycji ukośnej. Stosując wszystkie zmierzone punkty, oblicza się rozkład Gaussa. Dla każdego pomiaru  $n_F$  obliczyć należy opisaną normalną odległość  $N$ . Następnie oblicza się błąd pomiaru płaskości  $F_{x, y}$  jako zakres  $n_F$ :

$$F_x = N_{\max} - N_{\min} \quad (6)$$

Drugim z nich to **test odwzorowania głębokości** polegający na porównaniu głębokości mierzonej za pomocą czujnika do skalibrowanej głębokości. Kolejny to **test odwzorowania nachylenia krawędzi**, w którym profil krawędzi jest mierzony za pomocą czujnika, a wynik zastosowany jest do określenia rozdzielczości strukturalnej. I ostatecznie **testy odwzorowania kształtów falistych**, gdzie powierzchnia sinusoidalna wzorca mierzona jest za pomocą głowicy optycznej. Długość fali określona jest poprzez czynnik mierzonej amplitudy do skalibrowanej amplitudy większej niż 0,7. Długość fali porównana jest do określonej rozdzielczości.



### 2.3. Zestawienie metod

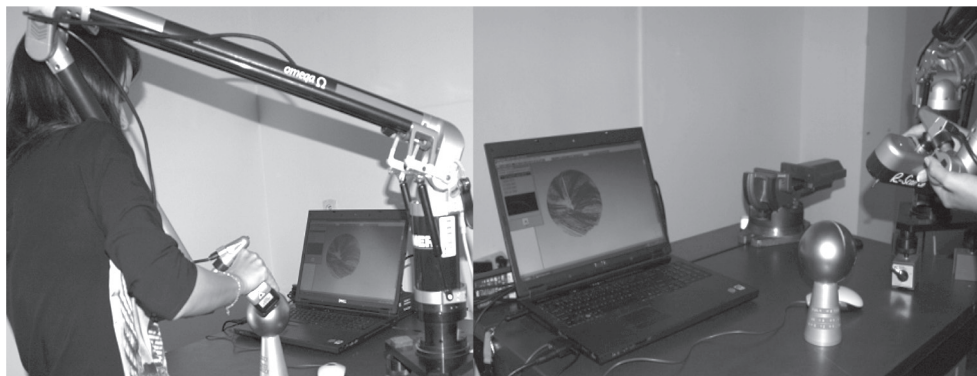
Zalecenia VDI/VDE oraz norma ISO 10360-8 pomimo, że dotyczą tego samego zagadnienia, różnią się od siebie w wielu aspektach. Należy zwrócić uwagę, że część 8 normy ISO 10360 dopiero wchodzi na rynek, podczas gdy VDI/VDE już swobodnie na nim funkcjonuje od dłuższego czasu. Już podczas pobieżnego przeglądu porównywanych wytycznych można zwrócić uwagę na rozbudowany charakter normy ISO 10360-8 w porównaniu z VDI/VDE. W VDI/VDE przedstawione są zalecenia do wyznaczania trzech podstawowych rodzajów błędów: błędu układu głowicy optycznej, błędu wskazania na długości oraz błędu płaskości. Norma ISO również obejmuje swym zakresem wymienione parametry jakościowe, ale w formie rozbudowanej o dodatkowy podział na cztery sposoby obliczania błędów głowicy. Różnice pojawiają się w ostatnim etapie obliczeń, tym sposobem otrzymujemy cztery różne końcowe podejścia, które niestety znacznie wydłużają prace nad wzorcowaniem poprzez konieczność wyeksportowania uzyskanych punktów do innego oprogramowania, podzielenia ich na 25 zbiorów, a następnie znalezienia jednego punktu, który byłby reprezentatywny dla każdego obszaru. Dodatkowo w normie ISO znajdują się trzy rodzaje testów badających odwzorowanie: głębokości, nachylenia krawędzi i kształtów falistych.

Wzorce stosowane w normie ISO oraz VDI/VDE do wyznaczania błędów układu głowicy optycznej oraz błędów płaskości są takie same w obydwóch przypadkach. Różnica, jaką można zaobserwować w przypadku wyznaczania błędu wskazania na długości polega na konieczności pokrycia przez wzorec stopniowy typu Ball Bar co najmniej 66% przestrzeni pomiarowej w normie ISO, czego nie było wcześniej w VDI/VDE. Według normy [N2] istnieje potrzeba zakupienia dodatkowych wzorców, takich jak wzorec sinusoidalny czy wzorec do określenia głębokości szczeliny.

### 3. Wpływ oprogramowania na wynik pomiaru wzorcowania

Zarówno normy [N2], jak i zalecenia [N1] podejmują próby określania liczby punktów przeznaczonych do usunięcia podczas przeprowadzanych filtracji, czyli jaki procent całego zbioru uważać można za tzw. szum, niestety żaden z powyższych dokumentów nie jest w stanie uwzględnić jądra leżącego w programach obsługujących dany system. Aby pokazać, jak dużą rolę odgrywa to zagadnienie, wykonano pomiar wzorcujący systemu optycznego WRP z głowicą R-Scan, zgodnie zaleceniami VDE/VDI [N1] (rys. 6), a następnie opracowano wyniki w czterech różnych dedykowanych programach do analizy powierzchni, tj. 3D Reshaper, Mesh 3D, PolyWorks oraz PowerInspect. **Przedstawione wyniki nie zostały przyporządkowane konkretnym programom zgodnie z wymienioną kolejnością, gdyż autorzy artykułu nie mieli na celu wyrokować, który program jest najskuteczniejszy, lecz w ich intencji było ukazanie wpływu oprogramowania na uzyskane wyniki.**

Zgodnie z zaleceniami [N1] kula pomiarowa została dokładnie oczyszczona i zamocowana w dziesięciu różnych ustawieniach przestrzeni pomiarowej, w celu umożliwiania pełnego pomiaru. Następnie dokonano pomiaru w wyniku czego uzyskano 10 chmur punktów. Te same chmury opracowano w każdym z czterech ww. programów. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 6. Pomiar wzorujący systemu optycznego WRP z głowicą R-Scan, zgodnie zaleceniami VDE/VDI

Fig. 6. Calibration measurement of optical system CMA with R-Scan probe, according to VDI/VDE recommendations

Tabela 1

#### Wyniki wzorcowania systemu optycznego na kuli

| Lp. kuli | Oprogramowanie 1 [mm] | Oprogramowanie 2 [mm] | Oprogramowanie 3 [mm] | Oprogramowanie 4 [mm] |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1        | 0,2434                | 0,2433                | 0,2303                | 0,2220                |
| 2        | 0,2041                | 0,2040                | 0,1992                | 0,2011                |
| 3        | 0,1242                | 0,1241                | 0,2092                | 0,2088                |
| 4        | 0,2231                | 0,2231                | 0,1122                | 0,1202                |
| 5        | 0,2102                | 0,2131                | 0,2110                | 0,2298                |
| 6        | 0,2331                | 0,2331                | 0,2433                | 0,2532                |
| 7        | 0,2921                | 0,2920                | 0,2720                | 0,2882                |
| 8        | 0,3065                | 0,3065                | 0,2799                | 0,2662                |
| 9        | 0,2853                | 0,2852                | 0,2731                | 0,2732                |
| 10       | 0,2488                | 0,2488                | 0,2201                | 0,2320                |

Jak pokazano, dwa programy mają ten sam algorytm tworzenia kuli za pomocą metody najmniejszych kwadratów, natomiast dwa pozostałe różnią się od siebie. Według wyżej przedstawionych wyników dla programów 1 i 2 maksymalna wartość to 0,3065, natomiast dla programów 2 i 3 odpowiednio 0,2799 i 0,2882.

Następnie zmierzony został wzorec długości w siedmiu różnych ustawieniach zgodnie z zaleceniami [N1], tak jak poprzednio te same chmury punktów zostały wyeksportowane do czterech programów.

Wyniki przedstawiono poniżej.

Wyniki wzorcowania systemu optycznego na wzorcu długości

| Lp. wzorca długości | Oprogramowanie 1 [mm] | Oprogramowanie 2 [mm] | Oprogramowanie 3 [mm] | Oprogramowanie 4 [mm] |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Odległość 1         | 0,2494                | 0,4332                | 0,1461                | 0,1461                |
| Odległość 2         | 0,6102                | 0,5323                | 0,0019                | 0,0019                |
| Odległość 3         | 0,4821                | 0,4423                | 0,2869                | 0,2869                |
| Odległość 4         | 0,3221                | 0,3653                | 0,0711                | 0,0711                |
| Odległość 5         | 0,4004                | 0,4263                | 0,2331                | 0,2331                |
| Odległość 6         | 0,4322                | 0,4253                | 0,1921                | 0,1921                |
| Odległość 7         | 0,5342                | 0,5122                | 0,1321                | 0,1321                |

Podobnie jak poprzednio dwa programy mają ten sam algorytm pozwalający określić odległości między środkami kul. Natomiast dwa są całkowicie różne. Zauważyć można również, że programy nr 3 i 4 znacznie lepiej poradziły sobie z wyznaczeniem odległości pomiędzy środkami kul. Według tab. 2 maksymalna wartość odległości zgodnie z oprogramowaniem nr 1 to aż 0,6102, zgodnie z oprogramowaniem nr 2 to 0,5323, natomiast zgodnie z oprogramowaniem nr 3 i 4 to 0,2869. Pozostaje pytanie: dlaczego jeśli dwa pierwsze oprogramowania wyznaczały promień kuli dokładnie tak samo, to odległość pomiędzy środkami kul obliczana jest inaczej, czy możliwe jest aby w takiej sytuacji środki były w innym miejscu?

Ostatnim testem było zmierzenie wzorca płaskości w sześciu pozycjach zgodnie z zalecanymi ustawieniami. Otrzymane w wyniku pomiaru chmury punktów zostały podobnie jak wcześniej przeanalizowane w czterech oprogramowaniach. Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Wyniki wzorcowania systemu optycznego na wzorcu płaskości

| Lp. wzorca | Oprogramowanie 1 [mm] | Oprogramowanie 2 [mm] | Oprogramowanie 3 [mm] | Oprogramowanie 4 [mm] |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Płaskość 1 | 0,2193                | 0,2193                | 0,3722                | 0,2071                |
| Płaskość 2 | 0,2221                | 0,2221                | 0,3751                | 0,2033                |
| Płaskość 3 | 0,1700                | 0,1700                | 0,3092                | 0,1924                |
| Płaskość 4 | 0,2094                | 0,2094                | 0,3451                | 0,1954                |
| Płaskość 5 | 0,2318                | 0,2318                | 0,4613                | 0,2152                |
| Płaskość 6 | 0,2109                | 0,2109                | 0,3371                | 0,1098                |

Zgodnie z wynikami parametr błędu płaskości wg Oprogramowania nr 1 i 2 wynosiłby 0,2318, natomiast wg oprogramowania nr 3 i 4 odpowiednio 0,4613 i 0,2071. Jak widać oprogramowanie nr 3 kompletnie odbiega od pozostałych.

#### 4. Podsumowanie

Dzięki zaprezentowanym wynikom, jak również przeprowadzonemu porównaniu dokumentów można zaobserwować iż wzorcowanie systemu optycznego wg zaleceń niemieckiego PTB [N1] jest znacznie mniej czasochłonne niż wg normy ISO [N2], jednak nie odzwierciedla tak szczegółowo możliwości systemów optycznych. Każdy użytkownik takiego systemu powinien mieć możliwość wyboru według jakiego dokumentu życzy sobie mieć wywzorcowany system, w zależności od zamierzonego obszaru zastosowań.

Jednak do momentu aż wszystkie oprogramowania nie ujednoczą algorytmów pozwalających na odwzorowanie elementu, nawet tak podstawowego jak kula czy płaszczyzna, użytkownik danego systemu nie będzie w stanie porównać jego dokładności z innym systemem. Nie będzie również możliwe jednoznaczne stwierdzenie, który system jest dokładniejszy, ponieważ jak uwidoczniły wyniki, jeden system lepiej radził sobie z wyznaczeniem promienia lub średnicy kuli, a inny z wyznaczeniem odległości lub płaskości. Nie każdy użytkownik jest w stanie określić przyczyny złych wyników pomiaru, mogą one leżeć w oprogramowaniu lub w ograniczonych możliwościach systemów do pracy z danymi elementami. Istotną kwestią dotyczącą wszystkich oprogramowań do analizy powierzchni jest zagadnienie usuwania tzw. szumów, będące następnym punktem badań autorów nad systemami optycznymi.

#### Literatura

- [1] Sładek J., *Dokładność pomiarów współrzędnościowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011, 495.
- [2] Sładek J., Gąska A., Kupiec R., Krawczyk M., *Badanie dokładności współrzędnościowej maszyny pomiarowej z wykorzystaniem laser tracera*, Mechanik nr 8-9/2012, Warszawa.
- [3] Sładek J., Ostrowska K., Gąska A., *Wirtualne współrzędnościowe ramię pomiarowe (WWRP)*, Proceedings of the 13th National & 4th International Conference Metrology in Production Engineering, 437-444.
- [4] Sładek J., Ostrowska K., Gąska A., *Modeling and identification of errors of coordinate measuring arms with use of metrological model*, Measurement 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.08.026>.
- [5] Sładek J., Gąska A., Olszewska M., Kupiec R., *Virtual Coordinate Measuring Machine Built Using Laser Tracker System and Spherical Standard*, Proceedings of Xth International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biała 2012.
- [6] Sładek J., Gąska A., *Evaluation of coordinate measurement uncertainty with use of virtual machine model based on Monte Carlo method*, Measurement 45, 2012, 1564-1575.
- [7] Sładek J., Ostrowska K., Gacek K., *Kinematic Metrological Model of the Coordinate Measuring Arm (Mcma)*, wydanie Journal IMEKO Fundamental and Applied Metrology, Lisbon, Portugal 2009.
- [8] Sładek J., Ostrowska K., Gąska A., *Wirtualne Współrzędnościowe Ramię Pomiarowe*, Pomiary-Automatyka-Kontrola, vol. 54, nr 01/2010, 75-77.

- [9] Sładek J., Kupiec R., Gaska A., Krawczyk M., *Badanie dokładności współrzędnościowej maszyny pomiarowej z wykorzystaniem laser trójkąta – zgodnie z ISO 10360-2:2009*, XIV Krajowa i V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Metrologia w Technikach Wytwarzania” Materiały konferencyjne, Warszawa 2011
- [10] Sładek J., Gaska A., Olszewska M., Ostrowska K., Ryniewicz A., *Metoda oceny dokładności pomiarów realizowanych za pomocą ramion pomiarowych wyposażonych w optyczne głowice skanujące*, Mechanik 02/2012.
- [11] Sładek J., Błaszczak P.M., Kupiec M., Sitnik R., *The hybrid contact-optical coordinate measuring system*, Measurement, Elsevier, 2011, vol. 44, issue 3.
- [12] Sładek J., Gaska A., *Modeling of the CMM probe head errors*, Proceedings of ISMQC 2010, Osaka, Japan.
- [13] McCann D., *Mobile metrology*. Cutting Tool Engineering, nr 10/2008, 60-63.
- [14] Ratajczyk E., Woźniak A., *Nowe trendy w budowie bezstykowy głowic pomiarowych stosowanych w maszynach współrzędnościowych*, Mechanik, nr 1/2005, Warszawa 2005, 32-35.
- [15] Sładek J., Ostrowska K., Olszewska M., Gaska A., Ryniewicz A., *Metody oceny dokładności pomiarów realizowanych za pomocą ramion pomiarowych wyposażonych w optyczne głowice skanujące*, Mechanik 02/2012.
- [16] Juras B., Sładek J., Szewczyk D., *Możliwość identyfikacji błędów kształtu przy wykorzystaniu skanera optycznego*, PAK, 2012.
- [17] Tabaka M., Szewczyk D., Sładek J., *Dokładność odwzorowania geometrii otworów z wykorzystaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej*, materiały konferencyjne 10 Międzynarodowa Konferencja Naukowa Współrzędnościowa Technika Pomiarowa 04.2012 Bielsko Biała.
- [18] Juras B., Szewczyk D., *Dokładność pomiarów realizowanych skanerem optycznym*, Postępy Nauki i Techniki, Politechnika Lubelska, 7/2011.
- [19] Sładek J., Ostrowska K., Gaska A., Gacek K., Kmita A., *Model matematyczny opisu dokładności Współrzędnościowych Ramion Pomiarowych*, Wydanie Inżynieria Maszyn, R.14, zeszyt 2, 2009, 20-3.
- [20] Gaska A., Olszewska M., *Ocena odwzorowania kształtu za pomocą współrzędnościowego ramienia pomiarowego wyposażonego w głowicę optyczną*, Postępy nauki i techniki, nr 07/2011, 37-43.
- [21] [N1] VDI-VDE-2634-Systeme-mit-flaechenhafter-Antastung
- [22] [N2] ISO 10360-8 Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 8: CMMs with optical distance sensors
- [23] [N3] ISO/TR 14638 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Übersicht;
- [24] [P1] Nr T10C 010 29 pt. „Opto-numeryczny system do pomiaru elementów geometrycznych zintegrowany z Współrzędnościową Maszyną Pomiarową”.



MARIUSZ OŹÓG, JACEK LUBCZAK\*

ZASTOSOWANIE OLIGOETEROLU SYNTEZOWANEGO  
Z MELEMU I WĘGLANU PROPYLENU  
DO OTRZYMYWANIA PIANEK POLIURETANOWYCH

APPLICATION OF OLIGOETHEROL SYNTHESISED  
WITH MELEM AND PROPYLENE CARBONATE  
FOR OBTAINING OF POLYURETHANE FOAMS

Streszczenie

W artykule przedstawiono warunki syntezy, strukturę i podstawowe właściwości fizyczne oligoeteroli otrzymanych w reakcjach melemu z węglanem propylenu, katalizowanych za pomocą DABCO. Zidentyfikowano produkty uboczne. Otrzymano sztywne pianki poliuretanowe o większej odporności termicznej i większej wytrzymałości na ściskanie od klasycznych pianek poliuretanowych.

*Słowa kluczowe: melem, węglan propylenu, oligoeterol, pianki poliuretanowe*

Abstract

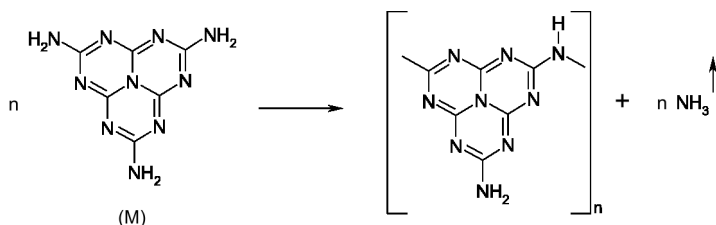
The conditions of synthesis, chemical structure and basic physical properties of the oligoethers obtained from melem and propylene carbonate with DABCO as a catalyst were presented in the paper. The by-products were identified. Obtained rigid polyurethane foams have higher thermal stability and higher compression strength than classical polyurethane foams.

*Keywords: melem, propylene carbonate, oligoetherol, polyurethane foams*

\* Mgr inż. Mariusz Oźóg, prof. dr hab. inż. Jacek Lubczak, Zakład Chemii Organicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Rzeszowska.

## 1. Wstęp

Melem (M) jest sześciofunkcyjną aminą heterocykliczną zawierającą w swej strukturze pierścień cyjamelurowy, charakteryzujący się bardzo dużą stabilnością termiczną. Analiza derywatograficzna melemu wskazuje, że jest to związek stabilny do temperatury 560°C [1], a powyżej tej temperatury przechodzi w melon, uwalniając jednocześnie gazowy amoniak [1, 2]:



Obecnie melem stosuje się do otrzymywania dodatków zmniejszających palność niektórych polimerów, takich jak poliestry, poliamidy, żywice epoksydowe i in. [3–5].

W pracy [6] przedstawiono metodę otrzymywania polieteroli z pierścieniem cyjamelurowym w reakcjach melemu z węglanem etylenu katalizowanych za pomocą DABCO (1,4-diazabicyklo[2.2.2]oktan), a w pracy [7] – zastosowanie jednego z takich polieteroli do wytwarzania sztywnych pianek poliuretanowych o zwiększonej odporności termicznej.

W niniejszym artykule opisano metodę otrzymywania oligoeteroli z pierścieniem cyjamelurowym w reakcjach melemu z węglanem propylenu (WP) katalizowanych za pomocą DABCO oraz wskazano możliwość ich zastosowania do otrzymywania sztywnych pianek poliuretanowych o zwiększonej odporności termicznej i wytrzymałości mechanicznej w porównaniu z piankami klasycznymi.

## 2. Część doświadczalna

### 2.1. Synteza oligoeteroli

Do kolby trój szyjnej o pojemności 250 cm<sup>3</sup>, zaopatrzonej w chłodnicę prostą z odbieralnikiem, mieszadło i termometr wprowadzono 32,73 g (0,15 mola) melemu, 183,7 g (1,80 mola) WP (uwaga) i 0,6 g DABCO jako katalizatora. Zawartość mieszano, ogrzewano do temperatury 170–180°C i utrzymywano w tym stanie do całkowitego przereagowania WP. Koniec reakcji określano na podstawie oznaczeń zawartości WP. Po zakończeniu reakcji oddzielano oligoeterol od nieprzereagowanego osadu, dodając do mieszaniny poreakcyjnej ok. 50 cm<sup>3</sup> wody w celu rozpuszczenia oligoeterolu. Zawartość przenoszono ilościowo do probówek i osad odwirowywano w wirówce laboratoryjnej. Czynność tę powtarzano jeszcze dwukrotnie. Wodne roztwory oligoeterolu łączono, a następnie oddestylowywano wodę w wyparce próżniowej, uzyskując produkt końcowy.

Równoległe z syntezą oddestylowywano małowcząsteczkowe produkty uboczne do odbieralnika, natomiast po zakończeniu syntezy tak zebrane produkty uboczne zważono, poddano rozdestylowaniu na 2 frakcje, które zidentyfikowano za pomocą spektroskopii protonowego rezonansu jądrowego.



**Uwaga:**

Wyjściowy stosunek molowy reagentów wynosił 1:12, czas reakcji 15 godzin. Przeprowadzono również reakcje przy wyjściowym stosunku molowym M:WP = 1:6 (czas reakcji 8 godz.) oraz 1: 24 (czas reakcji 37 godz.).

## 2.2. Otrzymywanie pianek poliuretanowych

Oligoeterol otrzymany w reakcji melemu z węglanem propylenu przy wyjściowym stosunku molowym reagentów 1:12, zastosowano do otrzymywania pianek poliuretanowych. Próby spieniania prowadzono w kubkach o pojemności 250 cm<sup>3</sup> w temperaturze pokojowej. Do odważonej masy oligoeterolu dodawano środek powierzchniowo czynny (Silicon 5340, Houdry Hüls, USA) oraz katalizator, którym była trietyloamina (TEA, cz.d.a., Fluka, Szwajcaria) i wodę w ilości 2% w stosunku do masy oligoeterolu. Po dokładnym wymieszaniu oligoeterolu z wymienionymi składnikami do mieszaniny wprowadzano odważoną ilość 4,4'-diizocyjanianu difenylometanu (cz., Merck, Niemcy) i energicznie mieszano do chwili rozpoczęcia kremowania. Mierzono czasy: kremowania, wzrostu i schnięcia oraz wizualnie oceniano jakość pianek. W tabeli 3 zestawiono skład mieszanek służących do otrzymania pianek oraz parametry spieniania i jakość uzyskanych pianek.

## 2.3. Metody analityczne

Przebieg reakcji określano, oznaczając nieprzereagowany WP metodą z wykorzystaniem wodorotlenku baru [8]. Analizę elementarną oligoeteroli wykonywano w analizatorze elementarnym firmy Vario, oznaczając zawartość węgla, wodoru i azotu. Widma <sup>1</sup>H-NMR produktów wykonano w spektrometrze <sup>1</sup>H-NMR firmy BRUKER o częstotliwości roboczej 500 MHz. Jako rozpuszczalnik stosowano d<sub>6</sub>-DMSO, a jako wzorzec wewnętrzny heksametylo-disiloksan. Widma IR wykonywano w postaci filmu kapilarnego (spektrometr ALPHA FT IR, prod. BRUKER).

## 2.4. Badanie właściwości fizycznych otrzymanych oligoeteroli

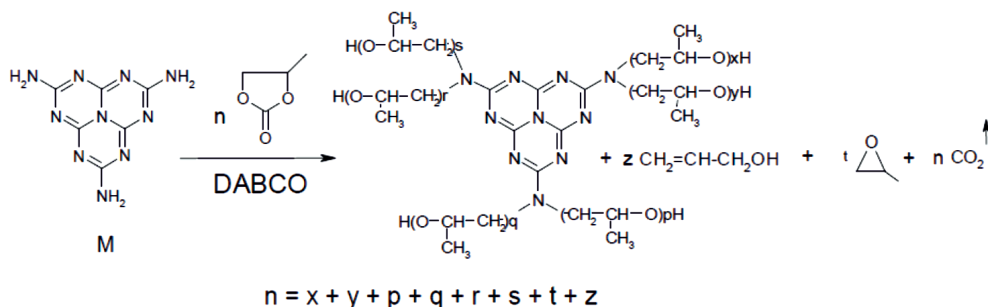
W oligoeterolach oznaczano współczynnik załamania światła (refraktometr Abbego), gęstość metodą piknometryczną, lepkość w viskozymetrze Höpplera (typ BHZ, prod. Prüfgeratewerk, Niemcy) i napięcie powierzchniowe metodą odrywania pierścienia [9, 10].

## 2.5. Badanie właściwości fizycznych pianek poliuretanowych

Zgodnie z normami [11–14] oznaczono gęstość pozorną, chłonność wody, stabilność wymiarów i odporność termiczną pianek w temperaturze 150, 175 i 200°C oraz ich wytrzymałość na ściskanie otrzymanych przed i po ekspozycji temperaturowej.

### 3. Analiza i omówienie wyników

W reakcjach melemu z nadmiarem WP otrzymuje się oligoeterole z pierścieniem cyjamelurowym zgodnie ze schematem:



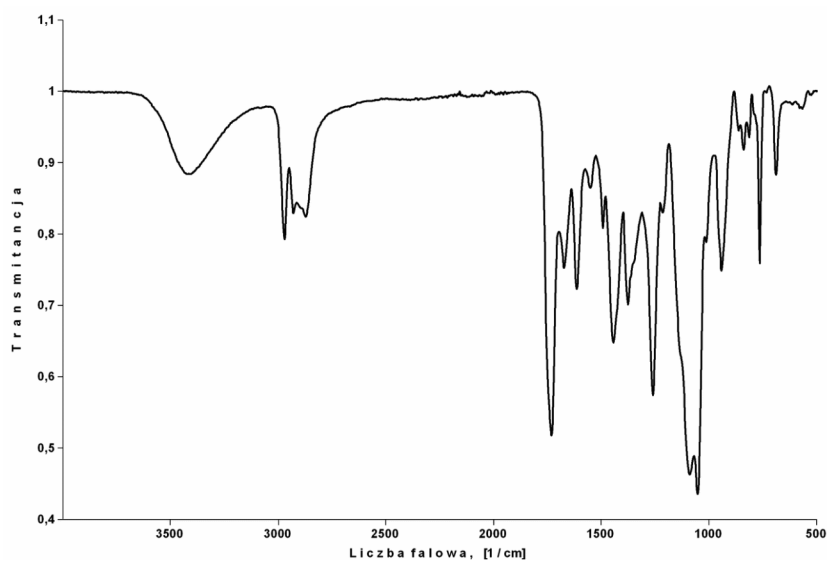
Otrzymane produkty są ciekłymi, brązowymi żywicami, dobrze rozpuszczalnymi w wodzie i w metanolu. Ponieważ po zakończeniu reakcji w mieszaninie poreakcyjnej pozostaje nieprzereagowany melem, stąd można sądzić, że powstające niższe hydroksyalkilowe pochodne melemu są lepiej rozpuszczalne w środowisku reakcji i łatwiej reagują z WP niż sam melem i dlatego w produktach otrzymuje się większą zawartość grup oksypropylenowych (obliczoną na podstawie procentowej zawartości azotu, tabela 1) niż to wynika z wyjściowego stosunku molowego reagentów.

Analiza elementarna (tabela 2) wskazuje, że otrzymane oligoeterole zawierają atomy azotu, a więc w ich strukturze obecny jest pierścień cyjamelurowy, co potwierdzają także ich widma IR, w których obserwuje się pasma przy 1614 i 763  $\text{cm}^{-1}$  charakterystyczne dla tego pierścienia [1]. Ponadto we wspomnianych widmach (rys. 1) występuje silne, szerokie pasmo drgań walencyjnych zasocjowanej grupy hydroksylowej w zakresie 3650–3100  $\text{cm}^{-1}$  oraz pasma pochodzące od walencyjnych asymetrycznych i symetrycznych drgań grup metylenowych i metylowych odpowiednio przy 2929 i 2870  $\text{cm}^{-1}$  oraz 2970 i 2872  $\text{cm}^{-1}$ . Obecność grupy hydroksylowej potwierdza ponadto pasmo drgań deformacyjnych przy częstotliwości 1376  $\text{cm}^{-1}$  oraz pasmo przy 1010  $\text{cm}^{-1}$  od drgań walencyjnych symetrycznych grupy O-H alkoholi I-rzędowych. Przy 1731  $\text{cm}^{-1}$  występuje pasmo od drgań walencyjnych grupy karbonylowej C=O wskazujące na możliwość wbudowywania się do struktury ugrupowań estrowych -COO-. Przy 1674  $\text{cm}^{-1}$  można zauważyć pasmo od drgań walencyjnych grupy >C=N w układach heteroaromatycznych. Na istnienie wiązań eterowych wskazuje silne pasmo przy 1088  $\text{cm}^{-1}$  od walencyjnych drgań asymetrycznych grupy C-O-C.

## Analiza składu oligoeteroli

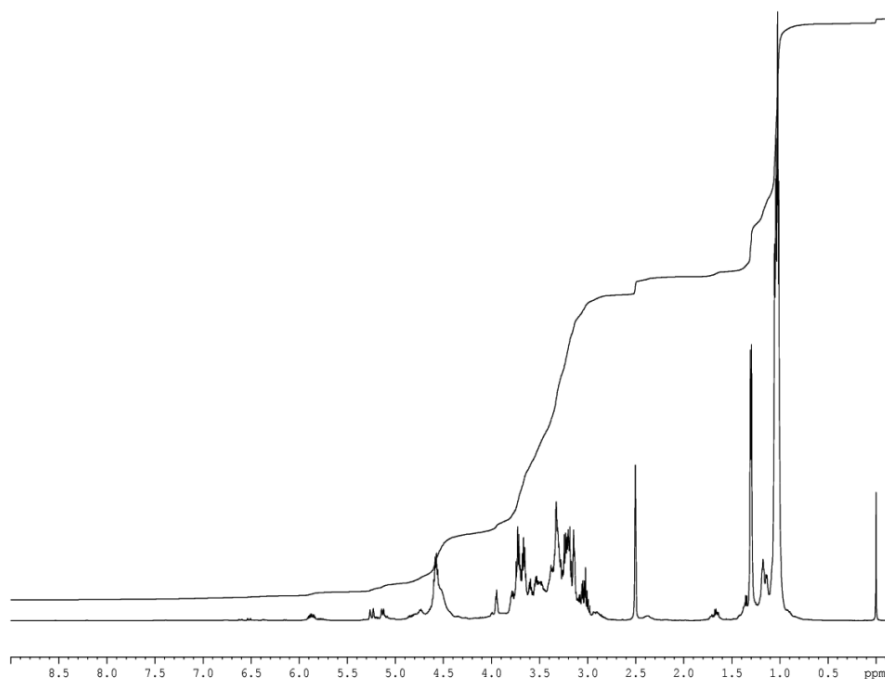
| Wyjściowy stosunek molowy M:WP | Zawartość w mieszaninie poreakcyjnej [% mas.] |             |                               | Zawartość alkoholu allilowego w oligoeterolu [% mas.] | Analiza elementarna oligoeterolu |       |       | w    |
|--------------------------------|---|-------------|-------------------------------|---|----------------------------------|-------|-------|------|
|                                | osad  | oligoeterol | oddestylowany produkt uboczny |   | C                                | H     | N     |      |
| 1:6                            | 42,7  | 45,6        | 11,7                          | –   | 55,47                            | 9,321 | 9,014 | 22   |
| 1:12                           | 23,3  | 63,7        | 13,0                          | 3,04  | 55,23                            | 9,255 | 7,994 | 25   |
| 1:24                           | 7,5   | 73,5        | 19,0                          | –   | 55,90                            | 9,447 | 7,543 | 26,7 |

w – liczba jednostek oksypropylenowych przypadających na cząsteczkę melemu wynikająca z analizy elementarnej



Rys. 1. Widmo IR oligoeterolu otrzymanego przy wyjściowym stosunku molowym M:WP = 1:12

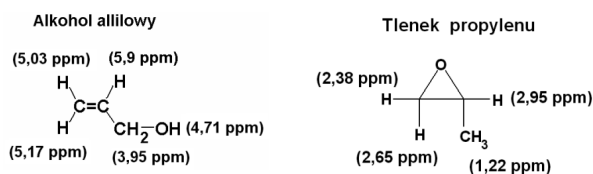
Fig. 1. IR spectrum of the oligoetherol obtained at initial molar ratio M: WP = 1:12



Rys. 2. Widmo  $^1\text{H}$  NMR oligoeterolu syntezowanego przy wyjściowym stosunku molowym M: WP = 1:12

Fig. 2.  $^1\text{H}$ -NMR spectrum of the oligoetherol synthesised at initial molar ratio M:WP = 1:12

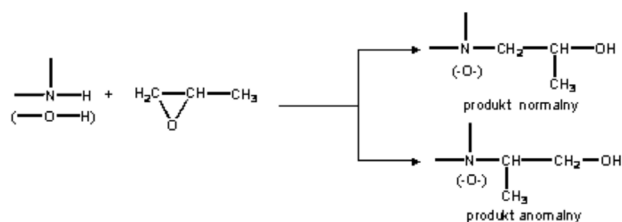
W widmie  $^1\text{H}$ -NMR oligoeterolu można zauważyć słabe sygnały pochodzące od protonów alkoholu allilowego (rys. 2, 3):



Rys. 3. Wartości przesunięć sygnałów od protonów alkoholu allilowego i tlenku propylenu

Fig. 3. Values of shifts in  $^1\text{H}$ -NMR signals from protons for allil alcohol and propylene oxide

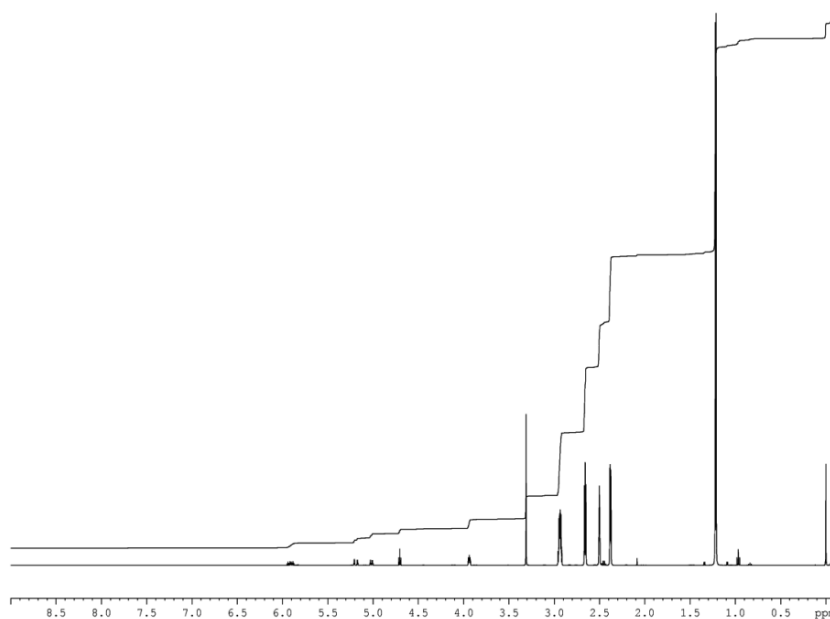
Przy 4,5–4,7 ppm występują sygnały od protonów grup hydroksylowych (zanikają po dodaniu  $\text{D}_2\text{O}$ ). W zakresie od 3,1 do 3,7 ppm występują sygnały pochodzące od protonów grup metylenowych połączonych z atomem azotu i tlenu. W widmie widać także sygnały protonów grup metylowych pochodzących od tzw. normalnych (1,1 ppm) i anomalnych (1,3 ppm) struktur wynikających z dwojakiemu sposobu otwierania pierścienia węglanu propylenu:



Brak sygnałów od protonów grup aminowych wskazuje, że wszystkie atomy wodoru w tych grupach zostały podstawione.

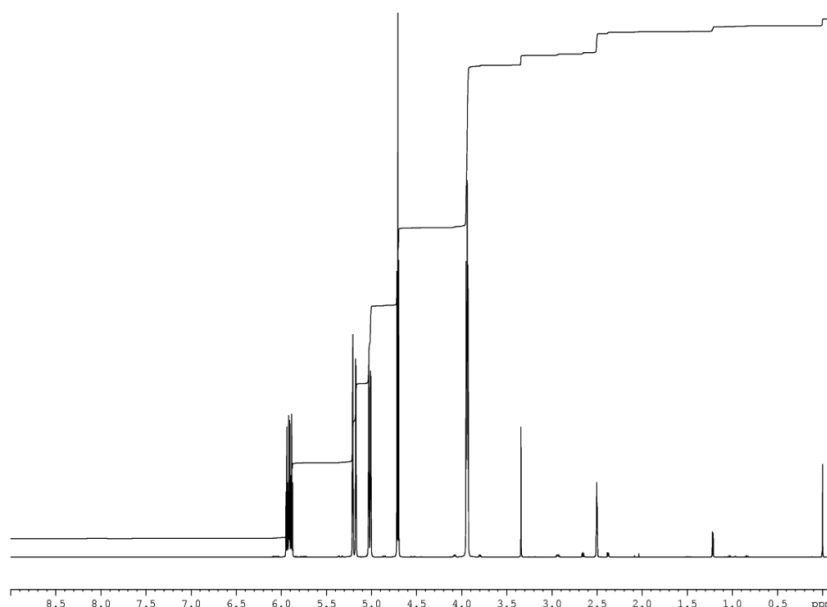
Oddestylowany produkt uboczny rozdestylowano na 2 frakcje, które zidentyfikowano jako tlenek propylenu oraz alkohol allilowy, stanowiący główny składnik produktu ubocznego (rys. 3–5).

Badania przeprowadzone przy różnym wyjściowym stosunku molowym melemu do WP (1:6, 1:12 i 1:24) wskazują, że dwukrotne zwiększenie ilości WP w kolejnych syntezach wpływa w niewielkim stopniu na zwiększenie zawartości grup oksyalkilenowych w produkcie (tabela 1). Z badań wynika również, że prowadzenie syntez przy mniejszym nadmiarze WP niż 6 moli/mol melemu jest kłopotliwe ze względu na trudności zwilżenia stałego melemu tak małą ilością WP i równomiernego wymieszania reagentów.



Rys. 4. Widmo  $^1\text{H}$  NMR destylatu (frakcja I) uzyskanego z produktu ubocznego w temperaturze wrzenia ok.  $34^\circ\text{C}$

Fig. 4.  $^1\text{H}$ -NMR spectrum of distillate (fraction I) from by-product obtained around boiling temperature  $34^\circ\text{C}$



Rys. 5. Widmo  $^1\text{H}$  NMR destylatu (frakcja II) uzyskanego z produktu ubocznego w temperaturze wrzenia 55–75°C

Fig. 5.  $^1\text{H}$ -NMR spectrum of distillate (fraction II) obtained from by-product around boiling temperature in range of 55–75°C

Zbadano niektóre właściwości fizyczne otrzymanych oligoeteroli, takie jak współczynnik załamania światła, gęstość, lepkość i napięcie powierzchniowe (tabela 2). Na podstawie wartości lepkości i napięcia powierzchniowego stwierdzono, że uzyskane oligoeterole mogą stanowić komponenty polioliowe do otrzymywania pianek poliuretanowych.

Tabela 2

**Właściwości fizyczne oligoeteroli z pierścieniem cyjamelurowym w temperaturze 20°C**

| M:WP | Współczynnik załamania światła | Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ] | Lepkość $\nu \cdot 10^3$ [Ns/m <sup>2</sup> ] | Napięcie powierzchniowe $\gamma \cdot 10^3$ [N/m] |
|------|--------------------------------|------------------------------|---|---|
| 1:6  | 1,4812                         | 1,1151                       | 2199,3  | 40,74   |
| 1:12 | 1,4778                         | 1,1024                       | 1214,6  | 38,50   |
| 1:24 | 1,4760                         | 1,0946                       | 859,36  | 37,66   |

Wstępne próby spieniania z użyciem wielofunkcyjnych izocyjanianów i wody potwierdziły te przypuszczenia. Badania przebiegu spieniania wykazały, że czas kremowania najlepszych kompozycji spienianych mieści się w zakresie 14–22 s, czas wzrostu 41–44 s, a czas schnięcia 67 s kompozycji nr 1 i 330 s kompozycji nr 5 (tabela 3). Te kompozycje zostały wzięte do dalszych badań. Badania wykazały dużą deformację kształtu pianki nr 1 podczas

ekspozycji temperaturowej, uniemożliwiająca dokonanie pomiarów wytrzymałościowych. Poszukiwanie składu kompozycji pozbawionej deformacji podczas ekspozycji temperaturowej wykazało, że należy dążyć do zwiększenia ilości izocyjanianu (kompozycje nr 4 i 5).

Tabela 3

### Wpływ składu kompozycji na przebieg spieniania

| Kompozycja nr | Masy składników na 100 g oligoeterolu [g] |      |                 | Przebieg spieniania |           |           | Charakterystyka pianki i spieniania   |
|---------------|---|------|-----------------|---------------------|-----------|-----------|---------------------------------------|
|               | Izocyjanian                               | TEA  | olej silikonowy | $t_k$ [s]           | $t_w$ [s] | $t_s$ [s] |                                       |
| 1             | 160,0                                     | 1,03 | 1,64            | 14                  | 44        | 67        | dobra, jedn. pory, za duża def. p. w. |
| 2             | 200,0                                     | 1,55 | 1,64            | 15                  | 35        | 59        | j.w.                                  |
| 3             | 240,0                                     | 1,55 | 1,64            | 19                  | 32        | 180       | j.w.                                  |
| 4             | 280,0                                     | 2,07 | 1,64            | 22                  | 38        | 200       | dobra, jedn. pory, mała def. p. w.    |
| 5             | 320,0                                     | 2,32 | 1,64            | 18                  | 41        | 330       | dobra, jedn. pory, brak def. p. w.    |

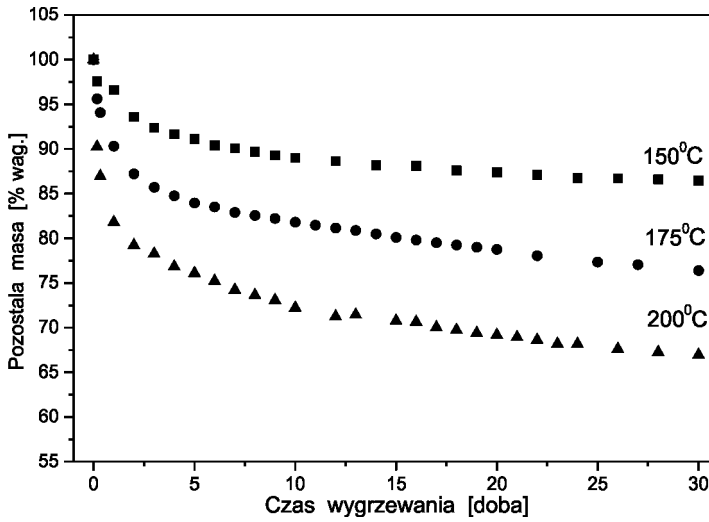
skrót:  $t_k$  – czas kremowania;  $t_w$  – czas wzrostu;  $t_s$  – czas schnięcia; jedn. – jednorodne, def. p. w. – deformacja podczas wygrzewania.

Tabela 4

### Właściwości fizyczne otrzymanych pianek poliuretanowych

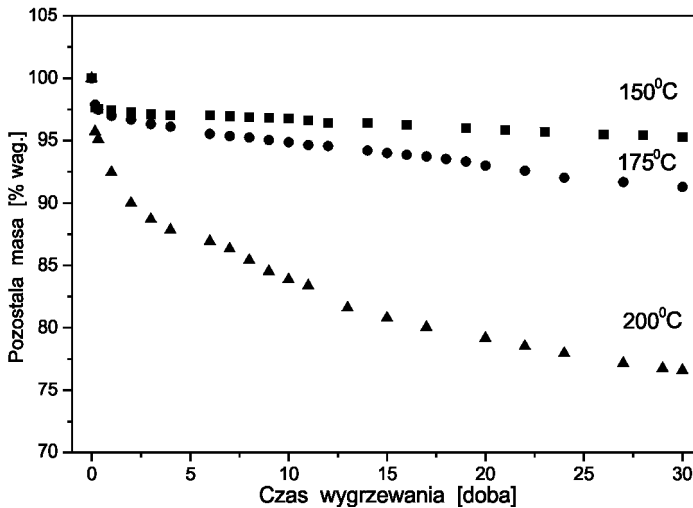
| Nr | Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ] | Chłonność wody [% objęt.] |            |             | Zmiana wymiarów liniowych w temp. 150°C [%] |             |             |             |             |             |
|----|------------------------------|---------------------------|------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|    |                              | po 5 min.                 | po 3 godz. | po 24 godz. | długość                                     |             | wysokość    |             | szerokość   |             |
|    |                              |                           |            |             | po 20 godz.                                 | po 40 godz. | po 20 godz. | po 40 godz. | po 20 godz. | po 40 godz. |
| 1  | 53,33                        | 1,3                       | 1,7        | 3,1         | –   | –           | –           | –           | –           | –           |
| 5  | 88,11                        | 5,2                       | 5,9        | 7,1         | 0,29  | 0,15        | 0,09        | –0,16       | 0,14        | –0,14       |

Otrzymane pianki w temperaturze pokojowej są sztywne, mają gęstość pozorną mieszczącą się w zakresie 53–88 kg/m<sup>3</sup>. Ich chłonność wody dochodzi maksymalnie do 7% po ekspozycji w wodzie w czasie jednej doby (tabela 4). Pianka nr 5 wykazuje niewielką zmianę wymiarów liniowych (–0,16–0,15%) podczas jej ekspozycji w temperaturze 150°C w czasie 40 godzin.



Rys. 6. Zmiany masy pianki poliuretanowej nr 1 podczas izotermicznego ogrzewania w funkcji czasu

Fig. 6. Changes of the mass as function of time for the polyurethane foam nr 1 during isothermal heating



Rys. 7. Zmiany masy pianki poliuretanowej nr 5 podczas izotermicznego ogrzewania w funkcji czasu

Fig. 7. Changes of the mass as function of time for the polyurethane foam nr 5 during isothermal heating



Badania odporności termicznej (rys. 6 i 7, tabela 5) wskazują, że pianka nr 1 w czasie 30 dni wygrzewania w temperaturze 150, 175 i 200°C traci odpowiednio ok. 14, 27 i 33% masy, natomiast pianka nr 5 traci mniej, tj. odpowiednio ok. 5, 9 i 23,5% masy. Wprowadzenie zatem do kompozycji większej ilości izocyjanianu powoduje lepsze dosięciowanie pianki w podwyższonej temperaturze i zwiększenie jej odporności termicznej. Otrzymane pianki przewyższają pod względem odporności termicznej klasyczne pianki poliuretanowe, które już w ciągu pierwszej doby w temperaturze 150°C zmniejszają masę o ok. 25%.

Charakterystyczną cechą otrzymanych pianek jest to, że mimo zmniejszającej się masy podczas wygrzewania w temperaturze 150 i 175°C następuje zwiększenie ich wytrzymałości na ściskanie dochodzące nawet do 24% w stosunku do wytrzymałości pianki niepoddawanej ekspozycji (tabela 5). Po ekspozycji w temperaturze 200°C następuje spadek wytrzymałości na ściskanie o ok. 20%. Pianki mają kilka razy większą wytrzymałość na ściskanie niż pianki klasyczne, ale po ekspozycji temperaturowej podczas ściskania pianki pękają zanim osiągną wartość odkształcenia równą 10%.

Tabela 5

#### Wytrzymałość na ściskanie otrzymanych pianek poliuretanowych

| Nr | Ubytek masy [% mas.]<br>po miesiącu ekspozycji<br>w temperaturze |       |       | Wytrzymałość na ściskanie [MPa] dla<br>odkształcenia $\delta$ |                              |                           | Zmiana wytrzymałości<br>na ściskanie [%] po<br>ekspozycji w tempe-<br>raturze |       |       |       |
|----|--|-------|-------|---|------------------------------|---------------------------|---|-------|-------|-------|
|    |  |       |       | przed<br>ekspo-<br>zycją<br>tempera-<br>turową                | po ekspozycji w temperaturze |                           |   |       |       |       |
|    | 150°C  | 175°C | 200°C |   | 150°C                        | 175°C                     | 200°C   | 150°C | 175°C | 200°C |
| 1  | 13,5   | 23,6  | 33,1  | 0,360<br>$\delta = 10\%$                                      | –                            | –                         | –   | –     | –     | –     |
| 5  | 4,7  | 8,7   | 23,4  | 0,720<br>$\delta = 10\%$                                      | 0,837<br>$\delta = 8,0\%$    | 0,895<br>$\delta = 5,9\%$ | 0,578<br>$\delta = 4,7\%$   | +16,3 | +24,3 | -19,7 |

Brak danych w tabeli dla pianek nr 1 wynika ze zbyt dużej deformacji kształtu.

Pianka nr 5 po ekspozycji temperaturowej pęka podczas badań wytrzymałościowych przed osiągnięciem odkształcenia o wartości 10%

#### 4. Podsumowanie

1. W reakcjach melemu z węglanem propylenu otrzymano nieopisane dotychczas w literaturze sześćofunkcyjne oligoeterole zawierające w swej strukturze termostabilny pierścień cyjamelurowy.
2. Reakcje należy prowadzić w obecności DABCO jako katalizatora, w temperaturze 170–180°C od ok. 10 do ok. 40 godzin w zależności od wyjściowego stosunku molowego reagentów. Produktami ubocznymi reakcji są alkohol allilowy i tlenek propylenu tworzące się w ilościach nie przekraczających na ogół 20%.
3. Uzyskane oligoeterole nadają się do otrzymywania sztywnych pianek poliuretanowych o zwiększonej odporności termicznej i wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z piankami tradycyjnymi.

### Literatura

- [1] Jürgens B., Irran E., Senker J., Kroll P., Müller H., Schnick W., J. Am. Chem. Soc., 125, 10288, 2003.
- [2] Lotsch B., Schnick W., Chem. Eur. J., 13, 4956, 2007.
- [3] Patent USA 2005/0101707, 2005.
- [4] Patent USA 2002/0010237, 2005.
- [5] Patent USA 7332534 B2, 2008.
- [6] Ożóg M., Lubczak J., Materiały IV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej ‘Nauka i Przemysł’ w Krakowie, 153, 2009.
- [7] Ożóg M., Lubczak J., Materiały VI Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej ‘Nauka i Przemysł’ w Krakowie, 122, 2011.
- [8] Kijowska D., Wołowicz S., Lubczak J., J. Appl. Polym. Sci., 93, 294, 2004.
- [9] Broniewski T., Iwasiewicz A., Kapko J., Płaczek W., *Metody badań i ocena własności tworzyw sztucznych*, Warszawa, WNT 1970.
- [10] Dryński T. *Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki*, PWN, Warszawa 1967.
- [11] EN ISO 845 (1995)
- [12] PN-93/C-89084
- [13] PN-93/C-89083
- [14] PN-93/C-89071

DEMIS PANDELIDIS, KRZYSZTOF RAJSKI\*

## POPRAWA EFEKTYWNOŚCI KOMBINOWANYCH SYSTEMÓW KLIMATYZACYJNYCH I ODSALAJĄCYCH WODĘ MORSKĄ WYKORZYSTYWANYCH PRZEZ KORPORACJE NAFTOWE

---

### IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF COMBINED AIR CONDITIONING AND WATER DESALINATION SYSTEMS USED BY OIL COMPANIES

#### Streszczenie

W niniejszym artykule przeanalizowano kombinowane systemy klimatyzacyjno-odsalające oparte na pośrednich rekuperatorach wyparnych, wykorzystywane przez korporacje naftowe (m.in. Exxon Mobil) wydobywające ropę na terenie Afryki i Bliskiego Wschodu, gdzie woda jest towarem deficytowym. Porównano pracę systemów opartych na wymiennikach o różnych schematach przepływu powietrza (współprądowym, przeciwprądowym, regeneracyjnym i krzyżowym). Położono nacisk na zwiększenie efektywności odparowania cieczy będącej źródłem wody pitnej oraz na uzyskanie możliwie niskiej temperatury powietrza nawiewanego do klimatyzowanych pomieszczeń.

*Słowa kluczowe: chłodzenie wyparne, odsalanie wody, model matematyczny*

#### Abstract

This paper examines the combined air-conditioning and desalination systems based on indirect evaporative recuperators used by oil companies (including Exxon Mobil) extracting oil in Africa and the Middle East, where water is scarce. Systems based on exchangers with different schemes of air flow (cocurrent, countercurrent, regeneration and cross) have been compared. The focus was on increasing the effectiveness of evaporation of the liquid, which is a source of drinking water and getting as low supply air temperature to the air-conditioned rooms.

*Keywords: evaporative cooling, water desalination systems, mathematical model*

---

\* Mgr inż. Demis Pandelidis, mgr inż. Krzysztof Rajski, Instytut Klimatyzacji i Ogrzewnictwa, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska.

**Oznaczenia:**

|                            |  |
|----------------------------|--|
| $c_p$                      | – ciepło właściwe, J/(kg/K)  |
| $\dot{G}$                  | – masowy strumień powietrza, kg/s  |
| $t$                        | – temperatura, °C  |
| $\overline{W}$             | – pojemność cieplna, W/K   |
| $x$                        | – zawartość wilgoci, kg/kg (g/kg)  |
| $X$                        | – oś w kierunku ruchu głównego strumienia powietrza,   |
| $Y$                        | – oś w kierunku ruchu pomocniczego strumienia powietrza,   |
| $Z$                        | – oś prostopadła do osi $X$ i $Y$ , zgodna z kierunkiem ożebrowania,   |
| $l$                        | – długość kanału, m  |
| $\overline{X} = X/l_x$     | – odcięta względna,  |
| $\overline{Y} = Y/l_y$     | – rzędna względna,   |
| $\overline{Z} = Z/h_{rib}$ | – wysokość żebra względna,   |
| NTU                        | – liczba jednostek przenikania ciepła,   |
| $q$                        | – jednostkowy strumień ciepła, W/m <sup>2</sup>  |
| $\overline{Q}$             | – moc chłodnicza, odniesiona do 1 m <sup>3</sup> wypełnienia, W/m <sup>3</sup>   |
| $i$                        | – entalpia właściwa wilgotnego powietrza, kJ/kg  |
| $\alpha$                   | – współczynnik przejmowania ciepła, W/(m <sup>2</sup> K)   |
| $\beta$                    | – współczynnik wymiany masy odniesiony do różnicy zawartości wilgoci, kg/(m <sup>2</sup> s)  |
| Le                         | – Liczba Lewisa,   |
| $\sigma$                   | – bezwymiarowy współczynnik uwzględniający nierównomierne zwilżenie powierzchni wypełnienia,   |
| $q^\circ$                  | – ciepło parowania wody, kJ/kg   |
| $s$                        | – skok ożebrowania,  |
| $\delta$                   | – grubość, m   |
| $h$                        | – wysokość (w przypadku żebra wysokość rozpatrywana jest jako połowa wysokości kanału – warunek symetrii ożebrowania; $h_{rib} = h_{kan}/2$ ), m |
| $m$                        | – współczynnik temperaturowy dla żebra,  |
| $\varphi$                  | – wilgotność względna, %   |
| $F$                        | – powierzchnia, m <sup>2</sup>   |
| $\lambda$                  | – współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m·K)  |

**Indeksy:**

|     |   |
|-----|---|
| $e$ | – wejściowy,  |
| $o$ | – wyjściowy,  |
| $p$ | – ścianka,  |
| '   | – odniesiony do powierzchni wymiany masy,                   |
| 1   | – odniesiony do głównego strumienia powietrza (kanału),     |
| 2   | – odniesiony do pomocniczego strumienia powietrza (kanału), |
| rib | – żebro,  |
| met | – warstwa metalu,   |
| ''  | – parametr odniesiony do powierzchni ścianki,               |
| *   | – parametr odniesiony do powierzchni ścianki,               |

- b* – początkowy,
- f* – końcowy,
- s* – ciepło jawne,
- l* – ciepło utajone.

## 1. Wstęp

Powierzchnia Ziemi w 70% pokryta jest wodą, jednak jedynie 3% spośród nich nadaje się do spożycia przez człowieka. Obecnie światowe źródła wody słodkiej narażone są na zanieczyszczenia spowodowane rosnącą liczbą ludności oraz wzmożoną industrializacją deficytowych w wodę obszarów globu. Występowanie coraz częstszych susz oraz presji demograficznej jest główną przyczyną nadmiernego pustoszczenia i zasolenia gleb, co ma swoje odbicie w gospodarce wodnej wielu regionów (głównie Afryki, Azji Centralnej i Bliskiego Wschodu). W 1992 roku Organizacja Narodów Zjednoczonych opracowała raport „Agenda 21” poruszający tematykę zwiększającego się deficytu wody w kryzysowych regionach świata [1]. Badania psychologiczne dowodzą, że suchy i gorący klimat wpływa pobudzająco na układ nerwowy człowieka, zwiększając jego podatność na agresywne zachowania. Stąd prognozuje się, iż deficyt wody na Bliskim Wschodzie czy w Afryce (problem zaczyna też dotyczyć terenów Azji Centralnej) może prowadzić do eskalacji napięć i konfliktów spowodowanych chronicznym brakiem wody [1].

Jednym z największych konsumentów wody pitnej w regionie Bliskiego Wschodu i Afryki są korporacje wydobywające ropę naftową, które wykorzystują ją w celach technologicznych oraz na potrzeby higieniczne i żywieniowe zatrudnionych pracowników. Dlatego społeczeństwa i narody azjatyckie i afrykańskie kładą coraz większy nacisk na ograniczenie zużycia wody przez zagraniczne konsorcja naftowe. Jednym ze sposobów uzyskiwania wody pitnej jest odsalanie wody morskiej, jednakże tradycyjne sposoby pozyskiwania wody tą metodą są stosunkowo drogie i nieefektywne. W ostatnich latach korporacje naftowe we współpracy ze światem nauki opracowały metodę pozyskiwania wody pitnej, umożliwiającą jednoczesne pokrycie wzmożonego zapotrzebowania mocy chłodniczej przez obiekty infrastrukturalne zlokalizowane w gorącym klimacie Afryki i Bliskiego Wschodu. Metoda ta opiera się na kombinowanych systemach klimatyzacyjno-odsalających opartych na pośrednich wymiennikach wyparnych.

Do wyparnych urządzeń chłodniczych zalicza się układy oparte na bezpośrednim i pośrednim odparowaniu czynnika chłodniczego (wody) [2]. Ochładzanie powietrza za pomocą parowania jest procesem wymiany ciepła i masy pomiędzy cieczą a gazem, który odbywa się przy przeważającej roli parowania powierzchniowego cieczy. Przy bezpośrednim ochładzaniu powietrza za pomocą parowania (występującym np. w komorach zraszania central wentylacyjnych) występuje kontakt powietrza z wodą, co doprowadza do obniżenia jego temperatury i zwiększenia zawartości wilgoci przy praktycznie niezmiennym entalpii. Z tego powodu wydajność chłodnicza urządzeń wyparnych bezpośrednich (odniesiona do ciepła całkowitego) jest równa zero. Pośrednie ochłodzenie za pomocą parowania jest procesem, podczas którego powietrze nie ma bezpośredniego kontaktu z wodą, a jego chłodzenie odbywa się przez powierzchnię wymiennika ciepła. W tym przypadku występują dwa strumienie powietrza: pierwszy (nazywany głównym), przepływa przez suchą część wymiennika i obniża swoją temperaturę przy niezmiennym zawartości wilgoci, po czym jest dostarczany do

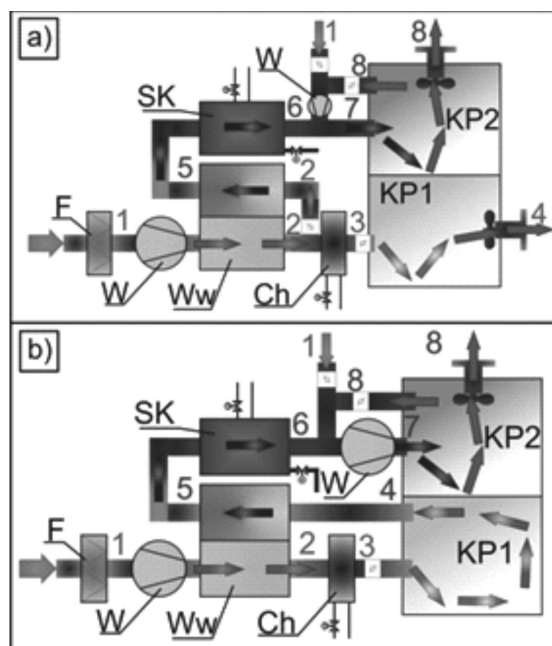
użytkowników pomieszczeń, drugi (nazywany pomocniczym lub roboczym) płynie kanałem pomocniczym, w którym zachodzi parowanie wody i akumuluje w sobie ciepła od przepływu głównego, po czym jest usuwany na zewnątrz. W takich wymiennikach ciepła proces ochładzania strumienia głównego powietrza odbywa się w suchych kanałach wypełnienia przy obniżającej się entalpii i niezmienniej zawartości wilgoci kosztem parowania wody w przyległych kanałach, wzdłuż których przepływa strumień pomocniczy powietrza.

Kombinowane systemy odsalająco-klimatyzacyjne opierają swoją pracę na zasilaniu pomocniczych kanałów wymienników wyparnych słoną wodą. Podczas realizowania procesów ochładzania wyparnej słodka woda paruje, pozostawiając sól w wypełnieniu. Jednocześnie prowadzi to do obniżenia temperatury powietrza płynącego w suchych kanałach, które może być wykorzystywane do klimatyzowania pomieszczeń. Nasycone powietrze pomocnicze prowadzone jest do sekcji kondensacji (zazwyczaj jest to przeponowy oziębiacz), na którym słodka woda jest wykraplana i odprowadzana do zasobników. Osuszone i oziębione powietrze pomocnicze może być również wykorzystane do klimatyzowania pomieszczeń. Praca systemu generuje dużą oszczędność energetyczną: pokrywa zapotrzebowanie na moc chłodniczą (dzięki pośredniemu wymiennikowi wyparnejmu powietrze ochładzane jest praktycznie za darmo) oraz wytwarza duże ilości wody pitnej, niezbędnej do funkcjonowania przedsiębiorstw.

Przykłady instalacji klimatyzacyjno-odsalających przedstawiono na rysunku 1. Powietrze o parametrach 1 jest czerpane z zewnątrz do systemu. Po przejściu przez suchy kanał wymiennika wyparnej jest ochładzane przy stałej zawartości wilgoci do stanu 2. Następnie strumień jest rozdzielany (rys. 1a): część powietrza dostarczana jest do pomieszczenia (po ewentualnym dochłodzeniu na wymienniku przeponowym do stanu 3), a część prowadzona jest do pomocniczego kanału jednostki wyparnej, gdzie ochładza przepływ główny i nawilża się wodą do stanu 5. Nasycony przepływ roboczy transportowany jest następnie do sekcji kondensacji, gdzie zostaje ochłodzony i osuszony do stanu 6. Uzyskana w ten sposób woda odprowadzona zostaje do zasobnika, a zimne powietrze wykorzystywane jest do klimatyzacji pomieszczeń. W przypadku, gdy część budynku nie wymaga dużych ilości świeżego powietrza, natomiast generuje duże zyski ciepła (np. serwerownie), można wykorzystać system oparty na wymienniku przeciwprądowym (rys. 1b). W tej sytuacji cały strumień po ochłodzeniu w wymienniku wyparnej i ewentualnym dochłodzeniu na chłodnicy przeponowej dostarczany jest do pomieszczenia. Po asymilacji zysków ciepła i wilgoci (osiągnięty stan 4, rys. 1b) zostaje z niego usunięty i przetransportowany do sekcji pomocniczej wymiennika wyparnej, gdzie nawilża się słodką wodą i akumuluje ciepło od powietrza w kanale suchym, osiągając stan 5. Następnie przepływa przez sekcję kondensacji (stan 6) i jest wykorzystywany do asymilacji zysków ciepła w klimatyzowanych pomieszczeniach. W przypadku, gdy temperatura osuszonego powietrza jest zbyt niska, można zastosować recyrkulację powietrza z pomieszczenia lub dodatkowe podmieszanie strumienia nawiewanego z powietrzem zewnętrznym (rys. 1a, b).

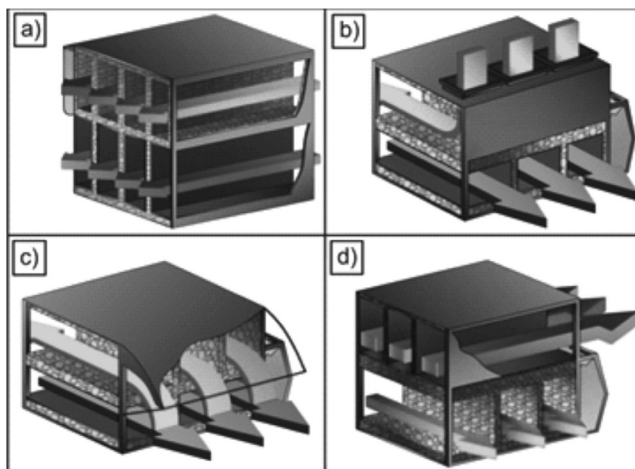
Z powodu coraz większego zainteresowania systemami klimatyzacyjno-odsalającymi, istotną stała się analiza pracy wymienników wyparnych, będących „sercem” całego systemu, umożliwiająca optymalizację procesów wymiany ciepła i masy w kanałach wypełnienia oraz określenie najbardziej skutecznego, dla zadanych warunków klimatycznych, schematu przepływu powietrza. Najskuteczniejszym narzędziem do optymalizacji i porównania różnych wymienników jest analiza teoretyczna za pomocą modelu matematycznego. Takie rozwiązanie umożliwi uzyskanie dokładniejszych wyników niż podczas pomiarów na stanowisku

badawczym z powodu niedoskonałości metod eksperymentalnych, spowodowanych niedokładnością przyrządów pomiarowych oraz niewielkimi wymiarami rekuperatorów uniemożliwiający dokładny pomiar parametrów termodynamicznych w kanałach wypełnienia. Ponadto model matematyczny pozwala na symulację pracy jednostki dla dowolnych parametrów powietrza zewnętrznego, co nie jest możliwe w rzeczywistym układzie pogodowym, gdyż jest on zależny od zmieniających się warunków atmosferycznych. Dlatego opracowano oryginalne  $\epsilon$ -NTU-modele [4, 6, 10–14] obrazujące pracę wymienników wyparych: krzyżowego, współprądowego, przeciwprądowego i regeneracyjnego (rys. 2), które zostaną poddane analizie porównawczej.



Rys. 1. Przykładowe systemy klimatyzacyjno-odsalające: a) oparte na wymienniku regeneracyjnym, b) oparte na wymienniku przeciwprądowym: F – filtr; W – wentylator; Ww – wymiennik wypary; Ch – chłodnica; SK – sekcja kondensacji; KP – klimatyzowane pomieszczenia

Fig. 1. Sample combined air conditioning and desalination systems: a) based on regenerative heat exchanger; b) based on countercurrent heat exchanger: F – filter, W – fan; Ww – evaporative heat exchanger, Ch – cooler, SK – section of condensation, KP – air conditioned rooms



Rys. 2. Analizowane pośrednie wymienniki wyparne: a) współprądowy; b) przeciuprądowy, c) regeneracyjny; d) krzyżowy

Fig. 2. Analysed indirect evaporative heat exchangers: a) concurrent; b) countercurrent; c) regeneration; d) cross

## 2. Model wymiany ciepła i masy

Założenia dotyczące konstrukcji wymienników (rys. 2, 3):

- analiza prowadzona jest na wymiennikach wyparnych o współprądowym, przeciuprądowym, krzyżowym oraz regeneracyjnym schemacie przepływu powietrza (rys. 2);
- kanał powietrza pomocniczego, wraz z ożebrowaniem wykonany jest z materiału porowatego, w którym ciecz rozprowadzona jest równomiernie za pomocą sił kapilarnych (rys. 3);
- kanał powietrza głównego oddzielony jest od kanału przepływu pomocniczego bardzo cienką, nieprzepuszczającą wody warstwą metalu (rys. 3);
- ożebrowanie kanału suchego wypełnione jest materiałem porowatym pokrytym warstwą metalu (budowa dwuwarstwowa – rys. 3);
- charakterystyczny wymiar żebra rozpatrywany jest jako połowa wysokości kanału  $h_{rib} = 0,5h_{ch}$  (założenie symetrycznego rozplywu ciepła w żebrach poszczególnych kanałów – rys. 3).

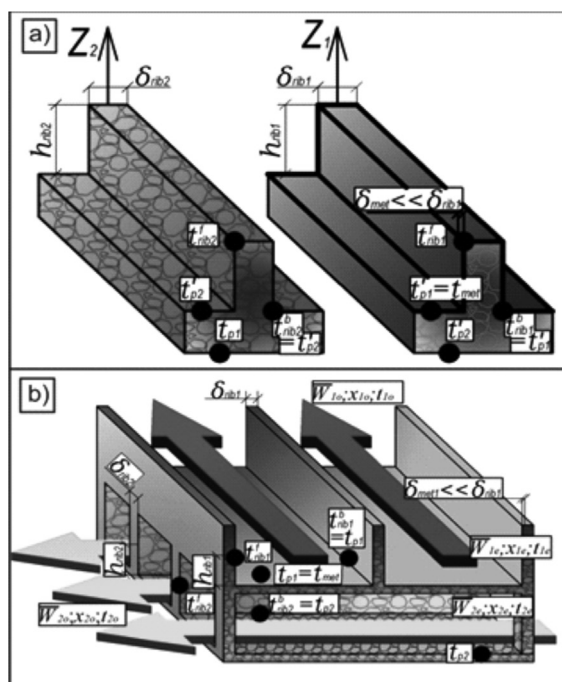
W procesie tworzenia  $\epsilon$ -NTU-modelu [7, 9] należy bezwarunkowo uwzględnić wpływ wzdłużnej nieizotermiczności wypełnienia, której rodzaje obrazowane są przez zależności różnicy temperatury wypełnienia i powietrza w kanałach (liniowa, wykładnicza, stopniowo skokowa lub mieszana), ponieważ wpływa ona na deformację rozdziału temperatury w warstwie przygranicznej oraz zmianę grubości tejże warstwy [3]. W tym celu należy wprowadzić odpowiednią, adekwatną do zmieniających się granicznych warunków na powierzchni wypełnienia zależność funkcjonalną współczynnika wymiany ciepła. W rozpatrywanym tu zagadnieniu, a także w wielu innych problemach inżynierskich, nie jest ważny rozdział parametrów termodynamicznych w poprzecznych przekrojach czynników pośredniczących w procesie wymiany ciepła i masy, a ich średnie całkowite wielkości, dlatego przy matematyczno-fizycznym opisie procesów zachodzących w rekuperatorach wyparnych uzasadnione



jest stosowanie  $\epsilon$ -NTU-modelu [2], dla którego przepływ powietrza w kanałach rozpatrywany jest jak strumień płynu ze stałą (w poszczególnych przekrojach poprzecznych) temperaturą i potencjałem wymiany masy, które równe są średnim wielkościom masowym [7, 9].

Założenia dotyczące osobliwości w przebiegu procesów wymiany ciepła i masy, uwzględnionych w procesie tworzenia modelu prezentują się następująco:

- strumień powietrza jest idealną mieszaniną gazową, składającą się z suchego powietrza oraz pary wodnej;
- gradient ciśnień cząstkowych pary wodnej w powietrzu oraz w warstwie granicznej przy wodzie nad powierzchnią materiału porowatego (gradient zawartości wilgoci) jest siłą ruchową przenoszenia masy;
- strumień powietrza posiada stałe, równe średnim całkowym wielkościom w przekroju poprzecznym charakterystyki kinetyczne;
- wzdłużne przewodzenie ciepła oraz wzdłużna dyfuzja molekularna pary wodnej w powietrzu są niewielkie;
- wpływ ciepła właściwego odparowanej pary wodnej na zmianę temperatury powietrza wilgotnego jest pomijalny;
- zużycie wody odpowiada pełnemu wyparowaniu wilgoci i utrzymywaniu materiału płyt porowatych w stanie nasycenia higroskopijnego (pojemność cieplna powietrza znacznie większa od pojemności warstwy wody).



Rys. 3. Charakterystyka wypełnień analizowanych wymienników: a) kanał mokry i suchy; b) pośredni wymiennik krzyżowy

Fig. 3. Analysed exchangers fulfillment's characteristics: a) wet and dry channel; b) indirect evaporative cross-flow heat exchangers

Równania rozpatrywanego  $\varepsilon$ -NTU-modelu opisujące procesy wymiany ciepła i masy realizowane są w ortogonalnym układzie współrzędnych. Kierunki osi w układzie współrzędnych:

- wymiennik współprądowy – oś  $X$  zgodna z kierunkiem przepływu strumienia głównego i pomocniczego, oś  $Y$  prostopadła do kierunku przepływu obydwu strumieni;
- wymiennik krzyżowy – oś  $X$  skierowana jest zgodnie z przepływem strumienia głównego, a  $Y$  pomocniczego;
- wymiennik regeneracyjny – oś  $X$  skierowana jest zgodnie z przepływem strumienia głównego, przeciwnie do ruchu przepływu pomocniczego, oś  $Y$  prostopadła do kierunku przepływu obydwu strumieni;
- wymiennik przeciwprądowy – oś  $X$  skierowana jest zgodnie z przepływem strumienia głównego, przeciwnie do ruchu przepływu pomocniczego, oś  $Y$  prostopadła do kierunku przepływu obydwu strumieni.

Procesy wymiany opisane są równaniami różniczkowymi bilansu masy i ciepła, sporządzonymi dla poszczególnych strumieni powietrza:

- **Wymiennik krzyżowy:**

$$\frac{\partial t_1}{\partial \bar{X}} = \text{NTU}_1^* (t_{p1} - t_1) \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib1}}}{s_{\text{rib1}}} \right) + \frac{2}{m_{\text{rib1}} s_{\text{rib1}}} \text{th}(m_{\text{rib1}} h_{\text{rib1}}) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial Y} = \text{NTU}_2^* \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \right) (t'_{p2} - t_2) + \frac{2h_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} (t'_{\text{rib2}} - t_2) d\bar{Z}_2 \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial Y} = \text{NTU}_2^* \left( \frac{1}{\text{Le}_2} \right) \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \right) \sigma_{p2} (x'_{p2} - x_2) + \frac{2h_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} \sigma_{\text{rib2}} (x'_{\text{rib2}} - x_2) d\bar{Z}_2 \right] \quad (3)$$

- **Wymiennik współprądowy:**

$$\frac{\partial t_1}{\partial \bar{X}} = \text{NTU}_1^* (t_{p1} - t_1) \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib1}}}{s_{\text{rib1}}} \right) + \frac{2}{m_{\text{rib1}} s_{\text{rib1}}} \text{th}(m_{\text{rib1}} h_{\text{rib1}}) \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial X} = \text{NTU}_2^* \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \right) (t'_{p2} - t_2) + \frac{2h_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} (t'_{\text{rib2}} - t_2) d\bar{Z}_2 \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial X} = \text{NTU}_2^* \left( \frac{1}{\text{Le}_2} \right) \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \right) \sigma_{p2} (x'_{p2} - x_2) + \frac{2h_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} \sigma_{\text{rib2}} (x'_{\text{rib2}} - x_2) d\bar{Z}_2 \right] \quad (6)$$

- Wymiennik regeneracyjny:

$$\frac{\partial t_1}{\partial \bar{X}} = \text{NTU}_1^* (t_{p1} - t_1) \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib1}}}{s_{\text{rib1}}} \right) + \frac{2}{m_{\text{rib1}} s_{\text{rib1}}} \text{th}(m_{\text{rib1}} h_{\text{rib1}}) \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial \bar{X}} = -\text{NTU}_2^* \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \right) (t'_{p2} - t_2) + \frac{2h_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} (t'_{\text{rib2}} - t_2) d\bar{Z}_2 \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial \bar{X}} = -\text{NTU}_2^* \left( \frac{1}{\text{Le}_2} \right) \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \right) \sigma_{p2} (x'_{p2} - x_2) + \frac{2h_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} \sigma_{\text{rib2}} (x'_{\text{rib2}} - x_2) d\bar{Z}_2 \right] \quad (9)$$

- Wymiennik przeciwaprądowy:

$$\frac{\partial t_1}{\partial \bar{X}} = \text{NTU}_1^* (t_{p1} - t_1) \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib1}}}{s_{\text{rib1}}} \right) + \frac{2}{m_{\text{rib1}} s_{\text{rib1}}} \text{th}(m_{\text{rib1}} h_{\text{rib1}}) \right] \quad (10)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial \bar{X}} = -\text{NTU}_2^* \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \right) (t'_{p2} - t_2) + \frac{2h_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} (t'_{\text{rib2}} - t_2) d\bar{Z}_2 \right] \quad (11)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial \bar{X}} = -\text{NTU}_2^* \left( \frac{1}{\text{Le}_2} \right) \left[ \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \right) \sigma_{p2} (x'_{p2} - x_2) + \frac{2h_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} \sigma_{\text{rib2}} (x'_{\text{rib2}} - x_2) d\bar{Z}_2 \right] \quad (12)$$

- Równaniem opisującym warunek ciągłości przepływu energii na granicach rozdziału faz:

$$\left( \frac{\lambda_p}{\delta_p} \right) \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib1}}}{s_{\text{rib1}}} \right) (t_{p1} - t'_{p2}) + \left( 1 - \frac{\delta_{\text{rib2}}}{s_{\text{rib2}}} \right) \left[ \alpha_2 (t_2 - t'_{p2}) + \left( \frac{\alpha}{c_p \text{Le}} \right)_2 \sigma_{p2} (x_2 - x'_{p2}) q_{p2}^o \right] = 0 \quad (13)$$

- Równaniem bilansu na powierzchni wypełnienia kanałów:

- Wymiennik krzyżowy

$$\left( \frac{W_1}{W_2} \right) \frac{\partial t_1}{\partial \bar{X}} + \frac{\partial t_2}{\partial \bar{Y}} + \left( \frac{q_p^o}{c_p} \right)_2 \frac{\partial x_2}{\partial \bar{Y}} + \Psi_2 (t_2, x_2) + \Omega_2 (q_{p2}^o, q_{\text{rib2}}^o) = 0 \quad (14)$$

- Wymiennik współprądowy

$$\left( \frac{W_1}{W_2} \right) \frac{\partial t_1}{\partial \bar{X}} + \frac{\partial t_2}{\partial \bar{X}} + \left( \frac{q_p^o}{c_p} \right)_2 \frac{\partial x_2}{\partial \bar{X}} + \Psi_2 (t_2, x_2) + \Omega_2 (q_{p2}^o, q_{\text{rib2}}^o) = 0 \quad (15)$$

– Wymiennik regeneracyjny

$$\left(\frac{W_1}{W_2}\right)\frac{\partial t_1}{\partial \bar{X}} - \frac{\partial t_2}{\partial \bar{X}} - \left(\frac{q_p^o}{c_p}\right)_2 \frac{\partial x_2}{\partial \bar{X}} - \Psi_2(t_2, x_2) - \Omega_2(q_{p2}^o, q_{rib2}^o) = 0 \quad (16)$$

– Wymiennik przeciwprądowy

$$\left(\frac{W_1}{W_2}\right)\frac{\partial t_1}{\partial \bar{X}} - \frac{\partial t_2}{\partial \bar{X}} - \left(\frac{q_p^o}{c_p}\right)_2 \frac{\partial x_2}{\partial \bar{X}} - \Psi_2(t_2, x_2) - \Omega_2(q_{p2}^o, q_{rib2}^o) = 0 \quad (17)$$

gdzie:

$\Psi_2(t_2, x_2)$  – poprawka uwzględniająca różne temperatury powierzchni ścianki  $t'_{p2}$  i powierzchni żebra  $t'_{rib2}$  w kanale powietrza pomocniczego:

$$\begin{aligned} \Psi_2(t_2, x_2) = & - \left[ \text{NTU}_2^* \left(1 - \frac{\delta_{rib2}}{s_{rib2}}\right) (t'_{p2} - t_{K+1}) \left(\frac{\sigma_p}{\text{Le}}\right)_2 \left(\frac{c_{pw}}{c_p}\right)_2 (x'_{p2} - x_2) \right] \\ & - \left[ \text{NTU}_2^* \frac{2h_{rib2}}{s_{rib2}} \left(\frac{1}{\text{Le}}\right)_2 \left(\frac{c_{pw}}{c_p}\right)_2 \int_{\bar{Z}_{K+1}=0}^{\bar{Z}_{K+1}=1} \sigma_{rib2}(x'_{rib2} - x_2)(t'_{rib2} - t_2) d\bar{Z}_2 \right] \approx 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$\Omega_2(q_{p2}^o, q_{rib2}^o)$  – poprawka uwzględniająca różny charakter procesu parowania wody na powierzchni ścianki kanału i powierzchni żebra (w tym różne wartości ciepła parowania przy różnych temperaturach ścianki i żebra):

$$\begin{aligned} \Omega_2(q_{p2}^o, q_{rib2}^o) = & \left[ \text{NTU}_2^* \left(\frac{1}{c_p \text{Le}}\right)_2 \frac{2h_{rib2}}{s_{rib2}} \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} q_{rib2}^o \sigma_{rib2}(x'_{rib2} - x_2) d\bar{Z}_2 \right] \\ & - \left[ \text{NTU}_2^* \left(\frac{q_p^o}{c_p \text{Le}}\right)_2 \frac{2h_{rib2}}{s_{rib2}} \int_{\bar{Z}_2=0}^{\bar{Z}_2=1} \sigma_{rib2}(x'_{rib2} - x_2) d\bar{Z}_2 \right] \approx 0 \end{aligned} \quad (19)$$

oraz równaniem przewodności ciepła w żebrze z uwzględnieniem strumienia ciepła utajonego przy parowaniu wody na powierzchni żebra:

$$\frac{\partial^2 t_{rib2}}{\partial \bar{Z}_2^2} = -m_{rib2}^2 h_{rib2}^2 \left[ (t_2 - t'_{rib2}) + \left(\frac{\sigma_{rib2}}{c_p \text{Le}}\right)_2 (x_2 - x'_{rib2}) q_{rib2}^o \right] \quad (20)$$

By uzyskać jednoznaczne rozwiązanie układu równań, system uzupełniany jest o warunki określające parametry termodynamiczne strumieni powietrza na wejściu do wymiennika:

- Współprądowego:

$$\begin{array}{cccc}
 t_1 \Big| = t_{1e} & x_1 \Big| = x_{1e} = \text{const} & t_2 \Big| = t_{2e} & x_2 \Big| = x_{2e} \\
 \bar{X} = 0 & \bar{X} = 0 \div 1 & \bar{X} = 0 & \bar{X} = 0 \\
 \bar{Y} = 0 \div 1 & \bar{Y} = 0 \div 1 & \bar{Y} = 0 \div 1 & \bar{Y} = 0 \div 1
 \end{array}$$

- Krzyżowego:

$$\begin{array}{cccc}
 t_1 \Big| = t_{1e} & x_1 \Big| = x_{1e} = \text{const} & t_2 \Big| = t_{2e} & x_2 \Big| = x_{2e} \\
 \bar{X} = 0 & \bar{X} = 0 \div 1 & \bar{X} = 0 \div 1 & \bar{X} = 0 \div 1 \\
 \bar{Y} = 0 \div 1 & \bar{Y} = 0 \div 1 & \bar{Y} = 0 & \bar{Y} = 0
 \end{array}$$

- Regeneracyjnego:

$$\begin{array}{cccc}
 t_1 \Big| = t_{1e} & x_1 \Big| = x_{1e} = \text{const} & t_2 \Big| = t_{2e} = t_{2o} & x_2 \Big| = x_{2e} = x_{2o} \\
 \bar{X} = 0 & \bar{X} = 0 \div 1 & \bar{X} = 1 & \bar{X} = 1 \\
 \bar{Y} = 0 \div 1 & \bar{Y} = 0 \div 1 & \bar{Y} = 0 \div 1 & \bar{Y} = 0 \div 1
 \end{array}$$

- Współprądowego:

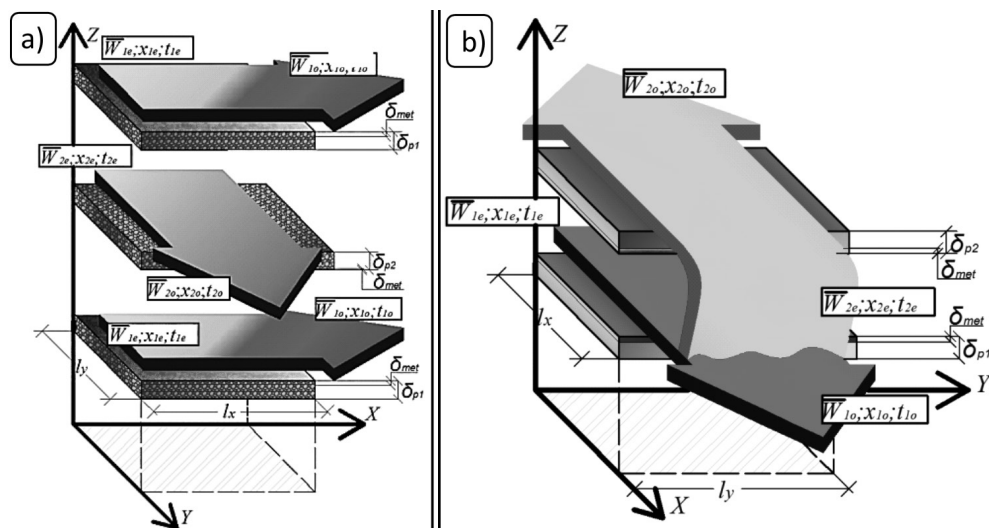
$$\begin{array}{cccc}
 t_1 \Big| = t_{1e} & x_1 \Big| = x_{1e} = \text{const} & t_2 \Big| = t_{2e} & x_2 \Big| = x_{2e} \\
 \bar{X} = 0 & \bar{X} = 0 \div 1 & \bar{X} = 1 & \bar{X} = 1 \\
 \bar{Y} = 0 \div 1 & \bar{Y} = 0 \div 1 & \bar{Y} = 0 \div 1 & \bar{Y} = 0 \div 1
 \end{array}$$

Dodatkowo układ uzupełnia się empiryczną zależnością między zawartością wilgoci nasyconej pary wodnej nad powierzchnią warstwy wody i jej temperaturą  $x' = f(t')$  oraz warunkiem początkowym i warunkiem symetrii dla ożebrowania.

W celu określenia wielkości NTU oraz liczby Lewisa (Le), wchodzących w układ równań modelu, niezbędne jest posiadanie informacji o charakterze praw rządzących zmianami gradientów wilgoci i temperatur w trakcie przepływu powietrza, jednakże jest to możliwe dopiero po wykonaniu dodatkowych badań numerycznych lub fizycznych.

W trakcie tworzenia modelu matematycznego obrazującego procesy wymiany ciepła i masy w rekuperatorze krzyżowym należy określić współczynnik wymiany masy  $\beta$  niezależnie od współczynnika wymiany ciepła  $\alpha$ , następnie ustalić wielkość liczby Lewisa, która będzie poprawką, w sytuacji, gdy warunki spełnienia zasady Lewisa zostaną naruszone. Podczas procesu iteracyjnego modelowania zakłada się kształt wzdłużnego gradientu różnic potencjałów transferu wilgoci i ciepła. Jeśli parametry założone i uzyskane po rozwiązaniu równań różniczkowych nie są zgodne z założonymi, należy skorygować charakter założonych zależności funkcjonalnych gradientów. Cykl ten powtarzany jest do momentu uzyskania zgodności charakteru wzdłużnych profili termodynamicznych na początku i końcu iteracji.

Zagadnienie to jest nieliniowe, dlatego niemożliwe jest uzyskanie rozwiązania metodami analitycznymi, z tego powodu całkowanie układu równań różniczkowych cząstkowych odbywa się za pomocą metod numerycznych.



Rys. 4. Przykładowe wizualizacje modeli matematycznych: a) wymiennik krzyżowy, b) wymiennik regeneracyjny

Fig. 4. Sample visualizations of mathematical models: a) cross-flow heat exchanger, b) regenerative heat exchanger

Do uzyskania rozwiązania numerycznego wykorzystano dyskretny model wg metody Rungego-Kutty czwartego rzędu, którego dokładność i stabilność jest wystarczająca do rozwiązywania tego typu zagadnień [7, 9, 10–14]. Opisany algorytm realizowany jest z użyciem stworzonego przez autorów wielomodułowego programu obliczeniowego. Sprawdzenie poprawności działania odbywało się zarówno za pomocą obliczeń wariantów ze znanymi rozwiązaniami, jak i poprzez obliczenia tych samych wariantów przy założonych różnych wartościach kroku całkowania. Określono, że najmniejsza ilość węzłów siatki obliczeniowej przy przyjętej dokładności obliczeń osiągnąca była przy kroku dyskretyzacji wzdłuż osi  $\bar{X}$  oraz  $\bar{Y}$  równym 0,01.

### 3. Analiza uzyskanych wyników obliczeń

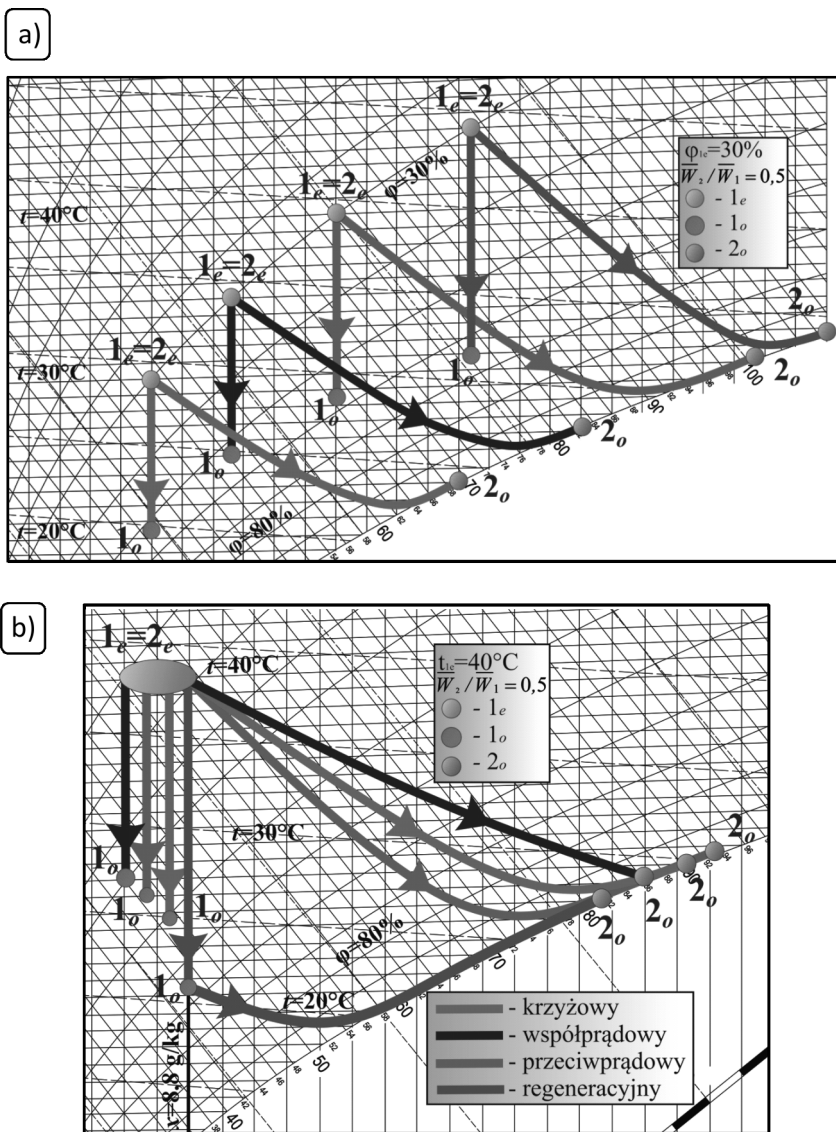
Po przeprowadzeniu wielowariantowych badań numerycznych uzyskano wyniki, pozwalające określić wstępne zależności zużycia wody i efektywności temperaturowej w odniesieniu do osobliwości konstrukcyjnych wymienników oraz do parametrów termodynamicznych powietrza zewnętrznego doprowadzonego do analizowanych jednostek chłodniczych.

Stwierdzono, że najwyższą skutecznością temperaturową i zarazem najmniejszą ilością odparowanej wody charakteryzował się wymiennik regeneracyjny (rys. 5–8). Teoretycznie sytuacja ta stanowi paradoks, gdyż racjonalne podejście sugeruje, że najniższa uzyskana temperatura powietrza nawiewanego powinna generować największe odparowanie cieczy. Jest to widoczne przy porównaniu wymiennika przeciwpądowego, współpądowego i krzyżowego. Paradoks jest spowodowany różną wartością strumieni przepływających przez urządzenie.

dzenia. Przykładowo dla stosunku liczbowego przepływu pomocniczego i głównego równo 0,5, przyjmując, że strumień główny wynosi 10 000 m<sup>3</sup>/h, strumień pomocniczy będzie wynosił 5 000 m<sup>3</sup>/h. Sumaryczny przepływ przez wymiennik współprądowy i krzyżowy wyniesie zatem 15 000 m<sup>3</sup>/h, natomiast przez regeneracyjny 10 000 m<sup>3</sup>/h, ponieważ w jednostce regeneracyjnej część strumienia głównego jest zawracana do kanału pomocniczego. Można to łatwo zauważyć przy porównaniu wykresów temperatur końcowych oraz mocy chłodniczych (rys. 6a, 8a), pomimo że wymiennik regeneracyjny uzyskuje najniższą temperaturę powietrza nawiewanego, jego moc chłodnicza jest najmniejsza z rozpatrywanych urządzeń. Przy zwiększeniu sumarycznego przepływu przez rekuperator regeneracyjny do 15 000 m<sup>3</sup>/h odparowanie wody byłoby większe. W praktyce niemożliwe staje się bezwzględne porównanie tego typu jednostek, natomiast możliwe jest stwierdzenie, że ilość odparowanej cieczy rośnie proporcjonalnie do efektywności chłodniczej jednostki (wyrażanej przez schłodzenie strumienia głównego do najniższej możliwej temperatury).

Odnotowano zwiększone odparowanie wody wraz ze wzrostem stosunku liczbowego przepływów pomocniczego do głównego (rys. 7b). Jest to spowodowane faktem, że większa ilość powietrza pomocniczego może nasycić się relatywnie większą ilością pary wodnej, czego efektem jest zwiększone parowanie cieczy w kanale pomocniczym. Uzyskana końcowa temperatura przepływu głównego będzie coraz niższa, wraz ze wzrastającym stosunkiem przepływów, co przy większej ilości możliwej do uzyskania słodkiej wody nasuwa wniosek, że niezbędne jest dążenie do maksymalizacji stosunku powietrza głównego i roboczego. Jest to utrudnione w przypadku jednostki regeneracyjnej, gdyż stosunek przepływów równy 1 oznacza, że cały strumień główny został zawrócony do kanału mokrego. Wymiennik o regeneracyjnym schemacie przepływu powietrza jest zatem najbardziej skuteczny w sytuacji dużego zapotrzebowania na moc chłodniczą, przy jednocześnie zmniejszonym zapotrzebowaniu na słodką wodę.

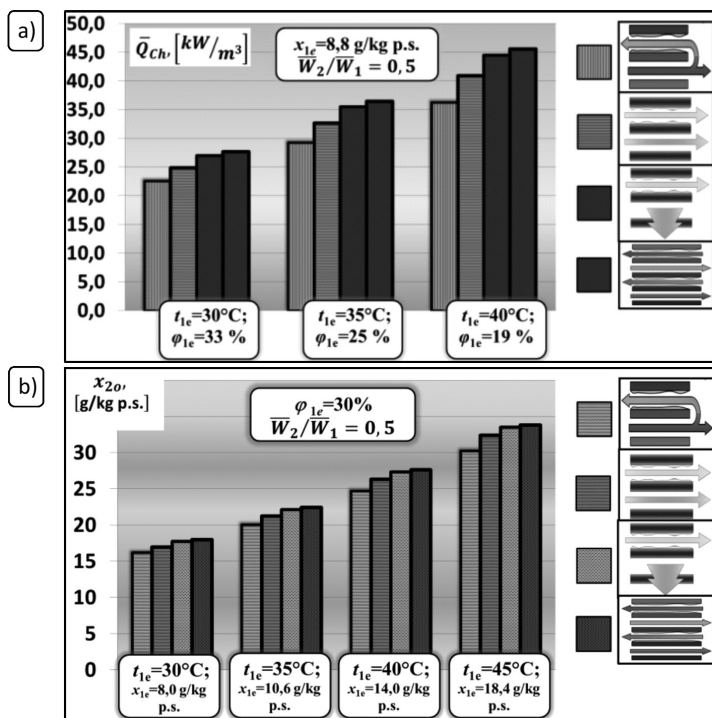
W przypadku gdy możliwe jest wykorzystanie powietrza wywiewanego do realizacji chłodzenia wyparnego w pomocniczych kanałach wypełnienia jednostek wyparnych, najbardziej skutecznym wymiennikiem, pod kątem uzyskania najniższej temperatury i maksymalnej ilości pitnej wody, jest rekuperator przeciwprądowy. Ponadto wymiennik przeciwprądowy i krzyżowy są korzystniejsze hydraulicznie w układzie nawiewno-wywiewnym, w przeciwieństwie do jednostki współprądowej (zastosowanie wymiennika regeneracyjnego w tym przypadku nie jest możliwe). Układ taki możliwy jest tylko w przypadku, gdy część klimatyzowanych pomieszczeń nie potrzebuje dużych ilości powietrza świeżego (np. serwerownie, pomieszczenia technologiczne czy magazyny).



Rys. 5. Wyniki obliczeń numerycznych na wykresie  $i$ - $x$ : a) przemiany zachodzące w wymienniku krzyżowym dla stałej wilgotności względnej; b) przemiany zachodzące we wszystkich analizowanych wymiennikach dla stałej zawartości wilgoci

Fig. 5. The results of numerical calculations on the  $i$ - $x$  chart: a) air changes taking place in cross-flow heat exchanger for constant relative humidity; b) air changes taking place in analysed heat exchanger for constant moisture content

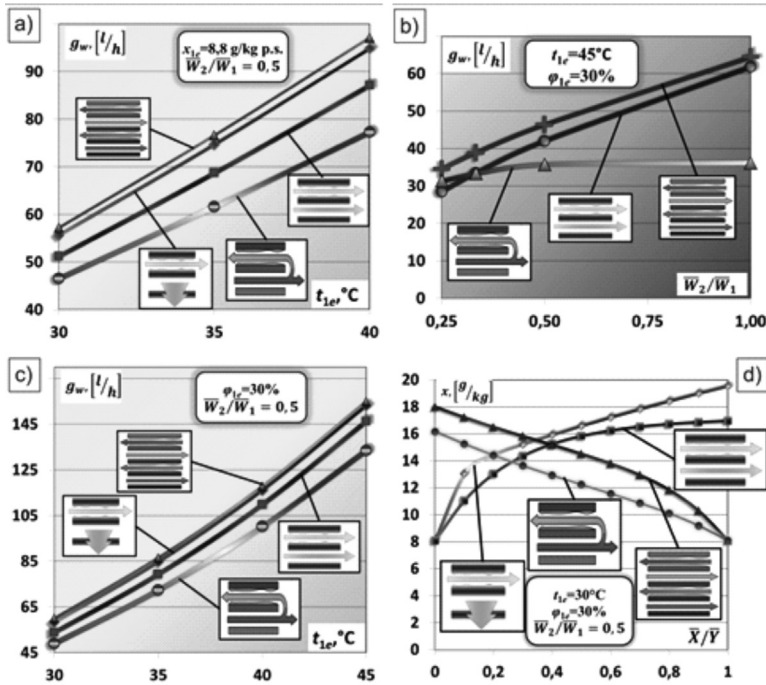




Rys. 6. Wyniki obliczeń numerycznych: a) zmiany mocy chłodniczej odniesionej do  $1 \text{ m}^3$  analizowanych wymienników przy stałej zawartości wilgoci na wejściu i zmiennej temperaturze i wilgotności względnej; b) uzyskane końcowe zawartości wilgoci przepływu pomocniczego analizowanych wymienników przy stałej wilgotności względnej na wejściu oraz zmiennej temperaturze i zawartości wilgoci

Fig. 6. The results of numerical calculations: a) changes of cooling capacity referenced to the  $1 \text{ m}^3$  of the heat exchangers for constant entrance moisture content and variable temperature and relative humidity; b) obtained a final moisture content of secondary air stream for constant entrance relative humidity and variable temperature and moisture content

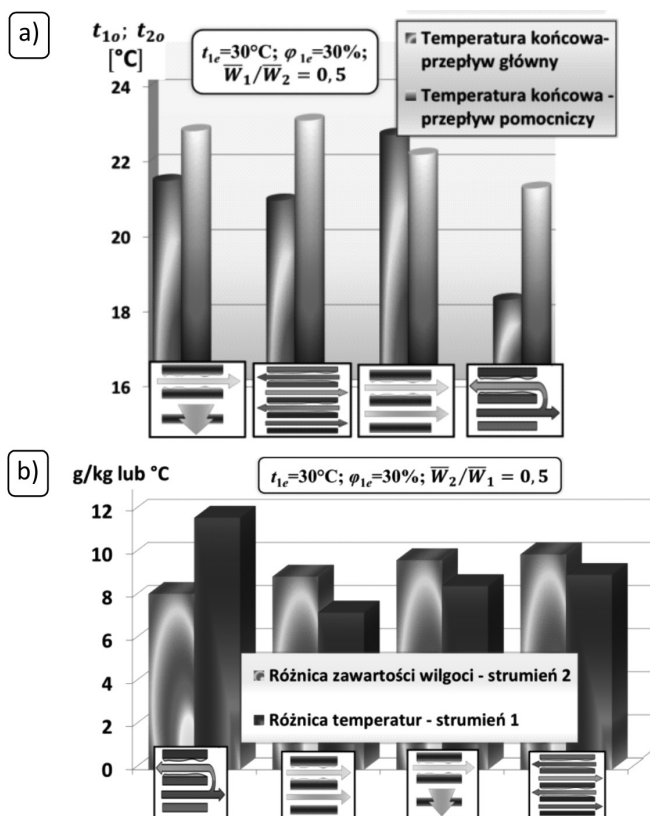
Korzyścią z zastosowania układu nawiewno-wywiewnego jest dodatkowe osuszenie powietrza na chłodnicy, co umożliwi lepszą asymilację pary wodnej w kanałach pomocniczych wyparnego rekuperatora. Jednostka przeciwprądowa jest również efektywna w przypadku pracy na powietrzu zewnętrznym – uzyskuje najniższą, po rekuperatorze regeneracyjnym, temperaturę powietrza nawiewanego (rys. 8a) przy jednocześnie największej ilości odparowanej wody (rys. 6b, 7). Jednak zastosowanie wymiennika przeciwprądowego w sytuacji, gdy zastosowanie systemu nawiewno-wywiewnego nie jest możliwe, jest bardzo utrudnione hydraulicznie. W tym przypadku często łatwiejsze jest zastosowanie wymiennika krzyżowego, którego skuteczność jest bardzo zbliżona (rys. 6, 7).



Rys. 7. Wyniki obliczeń numerycznych – ilość odparowanej wody dla poszczególnych wymienników (strumień pomocniczy  $5000 \text{ m}^3/h$ ): a) w zależności od temperatury, przy stałej zawartości wilgoci; b) w zależności od stosunku ilościowego przepływu pomocniczego do głównego, przy stałej temperaturze i wilgotności względnej; c) w zależności od temperatury, przy stałej wilgotności względnej; d) przyrost zawartości wilgoci strumienia powietrza pomocniczego

Fig. 7. The results of numerical calculations – the amount of evaporated water for each exchanger (secondary flow  $5000 \text{ m}^3/h$ ): a) depending on the temperature for constant entrance moisture content; b) depending on the ratio of secondary air flow to the primary air flow for constant entrance relative humidity and temperature; c) depending on the temperature for constant entrance relative humidity; d) increase the moisture content of the secondary air stream

Zaletą wymiennika regeneracyjnego jest stosunkowo niska uzyskana temperatura końcowa powietrza pomocniczego (rys. 5b, 8a). Niska temperatura, przy pełnym nasyceniu powietrza ( $\phi = 100\%$ ), pozwala na efektywne osuszanie w sekcji kondensacji bez zbędnego zużycia mocy na przechłodzenie strumienia nawiewanego do pomieszczeń (wynika to z mniejszej różnicy temperatury ścianki wymiennika przeponowego i nasyconego powietrza). Najmniej korzystną jednostką w odniesieniu do temperatury końcowej przepływu pomocniczego jest wymiennik przeciwprądowy, a najbardziej korzystnym, oprócz regeneracyjnego, współprądowy. Niestety rekuperator współprądowy cechuje się dość niską efektywnością chłodniczą oraz małą ilością pozyskiwanej cieczy. Jego zastosowanie w układzie nawiewnym jest natomiast bardzo korzystne hydraulicznie i generuje najmniejszą stratę ciśnienia.



Rys. 8. Wyniki obliczeń numerycznych: a) uzyskane temperatury końcowe powietrza głównego i pomocniczego; b) różnica zawartości wilgoci w powietrzu pomocniczym i odpowiadające jej różnice temperatur strumienia głównego

Fig. 8. The results of numerical calculations: a) the final temperatures obtained for the primary and secondary air streams; b) the difference of moisture content in secondary air stream and the difference of temperature in primary air stream

Stwierdzono, że na ilość wody uzyskiwanej przez dany wymiennik mają istotny wpływ parametry termodynamiczne doprowadzonego powietrza. Odnotowano, że proporcjonalnie do wzrostu temperatury doprowadzonego powietrza, przy stałej wilgotności względnej, odparowanie wody wzrasta w postępie geometrycznym (rys. 5a, 7b). Jest to spowodowane faktem, że wyższa temperatura sprzyja parowaniu, a przy tym samym potencjale wymiany masy (identyczna wilgotność względna), woda intensywniej paruje dla przepływu o wyższej temperaturze. Na spadek parowania wody ma wpływ większa wilgotność względna strumienia pomocniczego, co jest oczywiste, ponieważ zmniejsza potencjał wymiany masy powietrza: zbyt wysoka wilgotność względna istotnie zmniejsza efektywność chłodzenia wyparnego. Wyraźny wzrost mocy chłodniczej wymiennika, połączony z wzmożonym odparowaniem cieczy widoczny jest również w przypadku przyrostu temperatury i spadku wilgotności względnej, przy stałej zawartości wilgoci (rys. 6, 7a).

Istotny wpływ na pracę wymiennika wyparnego ma kształt linii nasycenia powietrza wilgotnego (rys. 5). Krzywa nasycenia w „lewej” części wykresu staje się coraz bardziej pionowa, natomiast po „prawej” stronie coraz bardziej pozioma. W przypadku parametrów powietrza roboczego położonych bliżej „pionowej” części krzywej, udział wymiany ciepła jawnego będzie się zwiększał, kosztem parowania, co zmniejszy odparowanie wody. Analogicznie położenie bliżej „poziomej” części linii nasycenia spowoduje zwiększone pozyskiwanie wody pitnej przez daną jednostkę chłodniczą.

Stwierdzono, że parowanie wody zachodzi najbardziej intensywnie w początkowej fazie przepływu powietrza (rys. 7d). Jest to spowodowane faktem występowania maksymalnego gradientu ciśnień cząstkowych pary wodnej zawartej w powietrzu oraz w warstwie granicznej nad cieczą, która powoduje gwałtowny przepływ masy do strumienia pomocniczego. Wraz z coraz większym nasyceniem powietrza parą wodną, przepływ masy zostaje zahamowany, aż do osiągnięcia względnie stałej wartości (w przypadku wymiennika krzyżowego i współprądowego). Dla wymiennika regeneracyjnego i przeciwprądowego przepływ masy jest niemalże liniowy, jednak na rysunku 7d widać, że na odcinku 1–0,8 na osi  $\bar{X}$  występuje bardziej intensywne odparowanie niż na w dalszych przekrojach.

#### 4. Wnioski

W artykule przedstawiono i uzasadniono oryginalne  $\varepsilon$ -NTU-modele opisujące procesy wymiany ciepła i masy w wymiennikach do pośredniego wyparnego ochładzania powietrza stosowane w kombinowanych systemach klimatyzacyjno-odsalających.

Na podstawie symulacji numerycznych stwierdzono, że najlepszym sposobem na zwiększenie pozyskiwania wody przez analizowane systemy oparte na pośrednich jednostkach wyparnych jest maksymalizowanie stosunku strumienia roboczego do głównego oraz dostarczanie powietrza możliwe suchego i gorącego. W przypadku klimatów bardziej wilgotnych można zastosować solarne systemy wyposażone w sorpcyjny osuszacz powietrza [10], który pozwoli na zwiększenie odparowania, a zatem zwiększenie pozyskiwania wody pitnej. Uzasadnione staje się zatem zastosowanie tego typu jednostek w klimatach suchych i gorących, co czyni je atrakcyjnymi dla korporacji naftowych z filiami w pustynnych regionach Afryki i Bliskiego Wschodu.

Przeprowadzona analiza klasycznych schematów przepływu czynników przez pośrednie wymienniki wyparne pod kątem najbardziej efektywnego wykorzystania potencjału nierównowagi termodynamicznej powietrza atmosferycznego do pozyskiwania energii chłodniczej i odsolonej wody wykazała, że najkorzystniejszy jest wymiennik przeciwprądowy. Jednak generują on pewne trudności w praktycznym wykorzystaniu, natomiast takich wad pozbawiony jest wymiennik krzyżowy. W wymienniku regeneracyjnym uzyskuje się najniższą temperaturę powietrza w kanałach mokrych co generuje oszczędności podczas procesu kondensacji. Wobec powyższego należy dążyć do opracowania mieszanych schematów przepływu.

Obecnie w Instytucie Klimatyzacji i Ogrzewnictwa Politechniki Wrocławskiej prowadzone są dalsze badania nad układami opartymi na pośrednich wymiennikach wyparnych o skomplikowanych schematach przepływu powietrza. Mają one na celu stworzenie pełnego modelu matematycznego, optymalizację procesów wymiany ciepła i masy, sprawdzenie możliwości ulepszenia urządzeń oraz określenie racjonalnych możliwości użycia takich jednostek w zależności od warunków klimatycznych z szczególnym uwzględnieniem naszego kraju.

## Literatura

- [1] Pawłowski M., *Woda jako źródło życia i konfliktów zbrojnych*, artykuł w wydaniu internetowym ([www.politykaglobalna.pl](http://www.politykaglobalna.pl)).
- [2] Anisimov S., Bolotin S., *Badania krzyżowych wymienników ciepła do pośredniego ochładzania powietrza*, Wiadomości Międzynarodowej Akademii Nauk Ochrony Środowiska, Ochrona Powietrza Atmosferycznego, Nr 2, 1996.
- [3] Žukauskas A., Žiugžda J., *Heat transfer in laminar flow of fluid*, Vilnius 1969.
- [4] Anisimov S., Pandelidis D., *Numerical study of the cross-flow heat and mass exchanger for indirect evaporative cooling*, Proceedings of the X<sup>th</sup> International Scientific Conference „Indoor Air and Environment Quality”, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Budapest University of Technology and Economics, Russian Academy of Architecture and Civil Engineering Science, Budapest, Hungary 2012.
- [5] Gillan L., *Maisotsenko cycle for cooling process*, Denver 2008.
- [6] Pandelidis D., Polushkin V., *Wymienniki do pośredniego ochładzania powietrza za pomocą odparowania cieczy*, Współczesne Metody i Techniki w Badaniach Systemów Inżynierskich, Wrocław 2011.
- [7] Anisimov S., Zuchowicki J., *Wymiana ciepła i masy w urządzeniach do pośredniego ochładzania powietrza za pomocą parowania wody przy mieszanym schemacie przepływu czynników*, Nowe Techniki w Klimatyzacji, materiały konferencyjne, Warszawa 2003.
- [8] Bogosłowski V.N., Poz M.J., *Podstawy fizyki cieplnej urządzeń systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji*, M.: Strojizdat, 1983.
- [9] Patankar S., *Metody numeryczne rozwiązań zagadnień wymiany ciepła i dynamiki cieczy*, M: Energia, 1984.
- [10] Anisimov S., Pandelidis D., *Poprawa efektywności solarnych układów klimatyzacyjnych*, Rynek Instalacyjny, 7-8/2012, 69-74.
- [11] Anisimov S., Pandelidis D., *Modelowanie matematyczne wymienników do pośredniego ochładzania powietrza za pomocą parowania cieczy o krzyżowym układzie przepływu czynników*, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, 8/2012, 315-320.
- [12] Anisimov S., Pandelidis D., Polushkin V., *The influence of outdoor air parameters on the efficiency of cross-flow indirect evaporative heat exchanger*, Civil Engineers Bulletin, Russia, 2012, in press.
- [13] Anisimov S., Pandelidis D., Polushkin V., *Use of indirect evaporative coolers in solar air conditioning units*, Recent developments in science and education, Russia 2012.
- [14] Anisimov S., Pandelidis D., *Efektywność wyparnego ochładzania powietrza*, Chłodnictwo & Klimatyzacja, 7/2012, 40-43.



PRZEMYSŁAW DANIEL PASTUSZAK\*

## BADANIA TERMOGRAFICZNE CYLINDRYCZNYCH PANELI KOMPOZYTOWYCH

---

### THERMOGRAPHIC TESTING OF CYLINDRICAL COMPOSITE PANELS

#### Streszczenie

Artykuł poświęcony jest wykrywaniu i ocenie defektów w strukturach kompozytowych. W tym celu wykorzystano impulsową metodę termografii w podczerwieni. W pracy omówiono zagadnienia związane z promieniowaniem podczerwonym, technikami termografii i formami zniszczenia struktur kompozytowych. Zaprezentowano wyniki badań cylindrycznych paneli z delaminacją poddanych statycznym obciążeniom ściskającym.

*Słowa kluczowe: IR NDT, kompozyty, termografia*

#### Abstract

The following paper is devoted to detection and evaluation of defects in composite structures. The method of pulsed infrared thermography was used. Additionally, the topics connected with infrared radiation, thermal imaging techniques and forms of failure of composite structures are discussed. The results of investigation for cylindrical panels with delamination subjected to static loads are presented.

*Keywords: IR NDT, composites, thermography*

---

\* Mgr inż. Przemysław Daniel Pastuszak, Instytut Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.



## 1. Wstęp

Dążenie do zwiększenia jakości produkcji towarzyszy nam od kilku dekad. Produkcja komponentów, które nie zawierają defektów, nie tylko zwiększa atrakcyjność rynkową produktu, ale pozwala na poprawę wydajności i pominięcie niepotrzebnych kosztów. Ponadto czynnikiem wartym uwagi jest bezpieczeństwo człowieka. Wdrożenie idei wytwarzania elementów wolnych od wad w dużej mierze polega na odpowiedniej kontroli na liniach produkcyjnych. Inspekcja dokonywana manualnie przez człowieka zawsze wiąże się z niedokładną oceną. Dlatego też czynności związane z automatyzacją tego procesu zwiększają powtarzalność i jednorodność ewaluacji, dodatkowo dają możliwość wykonywania go w środowisku pracy szkodliwym dla człowieka [1, 2].

W wielu wypadkach parametrem, który pozwala ocenić poprawność przebiegu procesu przemysłowego, jest temperatura. Tutaj znakomicie wpisuje się dziedzina wiedzy i techniki nazywana termografią w podczerwieni, gdyż za jej pomocą możliwy jest szybki i bezkontaktowy jej pomiar na powierzchni badanych obiektów. Do badań wykorzystywane są właściwości promieniowania podczerwonego, które jest przetwarzane za pomocą odpowiednich detektorów na sygnał elektryczny, zamieniany kolejno na obrazy termiczne (termogramy). Zaletą metod termografii w podczerwieni jest to, że nie ingerują w badany materiał, tym samym nie zmieniają jego właściwości użytkowych. Ze względu na omówione czynniki techniki te są zaliczane do grupy badań nieniszczących.

Rozwój w dziedzinie mikroelektroniki wpłynął na dostępność detektorów podczerwieni w przemyśle. Obecnie techniki termografii i termowizji nie tylko są wykorzystywane w wojsku, ale także znalazły zastosowanie w medycynie, elektroenergetyce, ciepłownictwie, ratownictwie, ekologii, hydrometeorologii i wielu innych dziedzinach. Należy tutaj zwrócić uwagę na jedno bardzo znaczące przeznaczenie omawianych urządzeń i metod do rejestracji promieniowania podczerwonego, mianowicie badania niszczące materiałów. W artykule na to właśnie zastosowanie położony został nacisk.

Rosnące wymagania do właściwości maszyn i urządzeń determinują postęp w zakresie struktury i budowy chemicznej materiałów z których są wytwarzane. Optymalne projektowanie to już nie tylko dobór odpowiedniego materiału, ale także jego zaprojektowanie o strukturze spełniającej założone parametry obciążenia, warunków eksploatacji i znikomej liczbie wad technologicznych. Tworzenie współczesnych materiałów polega na dobraniu składników o odmiennych właściwościach fizykochemicznych, które w połączeniu dają nowe, lepsze cechy. Sprostanie wymaganiom stawianym wobec nowoczesnych materiałów jest bardzo skomplikowane i trudne do osiągnięcia ze względu na złożoność zjawisk fizykochemicznych, przeprowadzenie skomplikowanych badań eksperymentalnych i opracowanie nowych procesów technologicznych [3, 4]. Dlatego też metody inspekcji odgrywają tutaj bardzo ważną rolę nie tylko podczas weryfikacji procesu produkcji, ale także okresowych kontroli gotowych już urządzeń.

Motyacją przy wyborze kompozytów włóknistych jako obiektu badań było ich szerokie spektrum zastosowań w nowoczesnych maszynach i urządzeniach. Należy również zwrócić uwagę na geometrię badanych struktur ze względu na liczne występowanie zakrzywionych i okrągłych kształtów w przemyśle.



## 2. Promieniowanie podczerwone

Promieniowanie podczerwone (IR) jest promieniowaniem elektromagnetycznym powstającym w wyniku oscylacyjnych i rotacyjnych drgań atomów i cząsteczek. Jego zakres długości fal zawarty jest pomiędzy światłem widzialnym i radiowym (od 780 nm do 1mm). Ciała fizyczne o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego (tj. 0°K, czyli -273,15°C) emitują promieniowanie podczerwone. W praktyce oznacza to, że każde ciało w naszym otoczeniu jest emitorem IR.

Promieniowanie podczerwone rozchodzi się w próżni i w innych ośrodkach fizycznych (np. powietrze, gazy) po linii prostej. Należy podkreślić, że wykazuje ono jednocześnie pewne cechy wspólne zarówno dla światła widzialnego, jak i dla fal radiowych. Przykład stanowi możliwość skupienia optycznego lub rozszczepienia za pomocą pryzmatów, a także rozchodzenie się w materiałach, które nie są przezroczyste dla światła widzialnego.

Poszczególne zakresy widma elektromagnetycznego odpowiadają różnym rodzajom promieniowania i nie są ściśle określone (częściowo zachodzą nawet wzajemnie na siebie). W oparciu o własności detektorów podczerwonych i materiałów optycznych wprowadzono umowny podział promieniowania podczerwonego na następujące obszary:

- bliską podczerwień (od  $\lambda = 0,7 \mu\text{m}$  do  $\lambda = 5 \mu\text{m}$ ),
- średnią podczerwień (od  $\lambda = 5 \mu\text{m}$  do  $\lambda = 30 \mu\text{m}$ ),
- daleką podczerwień (od  $\lambda = 30 \mu\text{m}$  do  $\lambda = 1000 \mu\text{m}$ ).

Podstawą rozważań na temat promieniowania podczerwonego jest tzw. ciało doskonale czarne, które pochłania całość promieniowania padającego na nie, niezależnie od kąta padania, długości fali i mocy źródła promieniowania.

Podczas prowadzenia pomiarów termowizyjnych istotna jest tzw. emisyjność powierzchni mierzonego obiektu. Jest to wielkość wprowadzona w celu odniesienia promieniowania ciała rzeczywistego do wzorca, jakim jest ciało doskonale czarne. Współczynnik ten określa zdolność danego ciała do emitowania własnej energii z pominięciem energii odbitej i przepuszczanej. Należy zaznaczyć, że zawiera się on w przedziale od 0 do 1. Pomiar temperatury materiałów posiadających współczynnik emisyjności bliski 1 jest prostszy i daje dokładniejsze wyniki. Współczynnik ten jest zależny od rodzaju materiału, stanu, barwy oraz temperatury jego powierzchni, a także długości fali i kąta padania promieniowania. Emisyjność ma prostą interpretację fizyczną, natomiast praktyka dowodzi, że jest to parametr trudny do określenia.

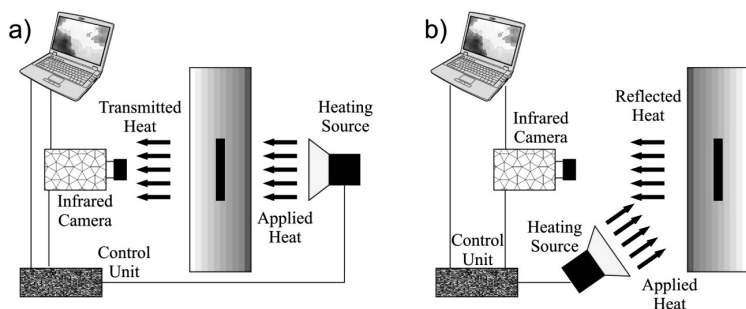
Kamery termowizyjne dostępne na rynku pracują w dwóch zakresach fal elektromagnetycznych: od 2  $\mu\text{m}$  do 5  $\mu\text{m}$  oraz od 8  $\mu\text{m}$  do 14  $\mu\text{m}$ . Ma to bezpośredni związek z przepuszczalnością dolnej warstwy atmosfery ziemskiej, w której występują tzw. „okna atmosferyczne” obejmujące powyższe zakresy. Poza wyznaczonymi granicami występuje bardzo silne pochłanianie promieniowania podczerwonego przez parę wodną, dwutlenek węgla i ozon, dlatego też wykonywanie pomiarów w innych przedziałach jest utrudnione.

## 3. Termografia w podczerwieni

Ogólnie rzecz biorąc, termografia w podczerwieni to dziedzina wiedzy i techniki zajmująca się detekcją, rejestracją i przetwarzaniem fal promieniowania podczerwonego. Dzięki właściwościom, które ono posiada, możliwy jest bezkontaktowy pomiar temperatury na po-

wierzchni badanych obiektów. Kamera termowizyjna wyposażona w odpowiedni detektor przetwarza energię padających fotonów promieniowania IR na sygnał elektryczny. Następnie uzyskany sygnał przetwarzany jest wizualizowany w postaci termogramów.

Można rozróżnić aktywne i pasywne procedury termografii w podczerwieni. Zasadnicza różnica polega na tym, że w badaniach metodą aktywną wykorzystuje się dodatkowo źródło stymulacji cieplnej obiektu. Natomiast techniki pasywne wykorzystują ciepło powstałe w wyniku jego funkcjonowania. Istnieje podział metod aktywnych według wzajemnego położenia urządzeń badawczych, rodzaju źródła cieplnej stymulacji czy też kształtu i wymiarów strefy stymulacji ciepła i rejestracji temperatury. Położenie źródła cieplnej stymulacji i urządzenia rejestrującego temperaturę możliwe jest w dwóch konfiguracjach: jednostronnej i dwustronnej. W pierwszym przypadku źródło stymulacji cieplnej i urządzenie rejestrujące temperaturę znajdują się po tej samej stronie badanego materiału, natomiast w drugiej konfiguracji są po przeciwnych stronach. Zostało to zobrazowane na rys. 1 [1, 5–9].



Rys. 1. Rozmieszczenie urządzeń badawczych w termografii aktywnej

Fig. 1. Arrangement of test equipment in active thermography

Termografia aktywna opiera się na tworzeniu fali cieplnej na powierzchni badanego obiektu. W zależności od zastosowanej metody może to być impuls prostokątny lub sinusoidalny. Fala cieplna jest różnie absorbowana przez poszczególne materiały. Zależy to przede wszystkim od częstotliwości wzbudzenia, ale także od właściwości termofizycznych, przewodnictwa cieplnego, pojemności cieplnej i gęstości testowanych materiałów. Zakres głębokości jest wyraźnie większy w metalach niż w tworzywach sztucznych. Jeżeli fala cieplna dotrze do obszarów, gdzie właściwości termofizyczne różnią się (delaminacja, wtrącenia, porowatość), jest częściowo odbijana, co widać na powierzchni stygnącej próbki w postaci zaburzonego rozkładu temperatur. Oceniając amplitudę lokalnej temperatury powierzchni, można otrzymać informację o wewnętrznej strukturze (głębokości defektu). Zastosowanie to ma sens wtedy, gdy grubość materiału odpowiada w przybliżeniu długości fali cieplnej oraz w przypadku, gdy występują różnice we właściwościach termofizycznych badanego materiału i defektu. Źródłem stymulacji cieplnej badanych obiektów mogą być: promieniowanie optyczne, prądy wirowe, prąd elektryczny, drgania mechaniczne i inne. Niewątpliwą zaletą badań termograficznych jest możliwość badania elementów termicznie wrażliwych. Aby osiągnąć optymalne wyniki dla obiektów o nieznanych lub nieokreślonych charakterystykach cieplnych, należy wykonać różne pomiary dla różnych częstotliwości. Fale cieplne rozchodzące się w materiale są silnie tłumione, dlatego też głębokość pomiarów

jest limitowana. Zakres ten silnie zależy od częstotliwości wzbudzenia – im niższa częstotliwość, tym większa głębokość penetracji. Przez zmianę częstotliwości można analizować strukturę materiału na różnych głębokościach [5–9].

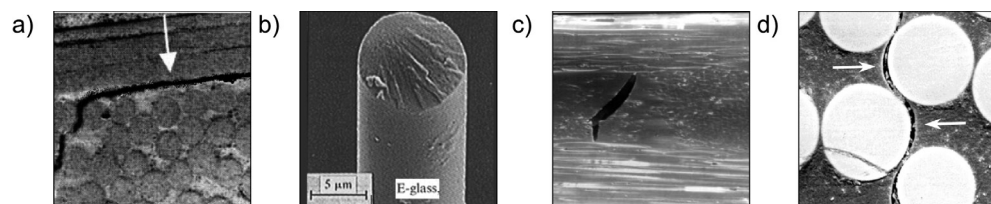
Podczas badań termograficznych wymagana jest specjalistyczna wiedza uwzględniająca cechy charakterystyczne badanych obiektów oraz umiejętności związane z obsługą urządzeń rejestrujących, odczytu i interpretacji termogramów [11, 12]. W trakcie przeprowadzania pomiarów należy uwzględnić kilka czynników zewnętrznych, które mają istotny wpływ na wyniki (poziom sygnału generowanego przez kamerę termowizyjną). Do kamery termowizyjnej dociera nie tylko promieniowanie podczerwone pochodzące od badanego obiektu, ale także te z otoczenia i odbite od powierzchni obiektu. Ponadto promieniowanie podczerwone jest tłumione (pochłaniane) przez atmosferę i wszelkiego rodzaju czynniki znajdujące się pomiędzy detektorem a badanym obiektem (np. gazy, dymy, pyły).

#### 4. Formy zniszczenia struktur kompozytowych

Ogólną cechą charakterystyczną dla materiałów kompozytowych (zarówno dla obciążeń statycznych, jak i zmęczeniowych) jest stopniowy rozwój zniszczenia od lokalnych mikro-defektów do finalnego globalnego zniszczenia konstrukcji (obiekt nie spełnia swoich funkcjonalnych zadań). Aby opisać lokalne i globalne formy zniszczenia konstrukcji wykonanych z materiałów kompozytowych, wprowadzono różne warianty podejść:

- model mikroskopowy – zbrojenie i osnowę traktuje się jako materiał niezależny,
- model pośredni – każda warstwa indywidualna tworząca laminat traktowana jest jako ośrodek jednorodny,
- model makroskopowy – cała struktura traktowana jest jako ośrodek jednorodny [3].

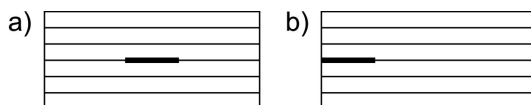
Nie jest do końca znana kolejność występowania form zniszczenia mikroskopowego. Można jednak wprowadzić generalny podział na zniszczenia występujące wewnątrz warstwy indywidualnej laminatu (pękanie osnowy, włókien, oddzielenie włókien od osnowy) i zniszczenia występujące na granicy warstw (delaminacje). Materiały kompozytowe, w których wystąpiły przedstawione formy zniszczenia, charakteryzują się obniżoną sztywnością i wytrzymałością, zwłaszcza w miejscach koncentracji naprężeń. Na rys. 2 zaprezentowano przekroje laminatów, gdzie wystąpiły omawiane rodzaje zniszczenia materiałów kompozytowych.



Rys. 2. Formy zniszczenia materiałów kompozytowych: a) delaminacje, b) pękanie włókien, c) pękanie osnowy, d) oddzielenie włókien od osnowy

Fig. 2. Forms of failure of composite structures: a) delaminations, b) fibre breakage, c) matrix cracking, d) fiber debonding

Proces delaminacji (czyli rozwarstwianie warstw indywidualnych) spowodowany jest przez powtarzające się obciążenia dynamiczne, błędy technologiczne w procesie produkcji, brak preparacji włókien szklanych powodujący złe przyleganie żywicy, nieodpowiednie warunki termiczne w trakcie utwardzania lub powstaje w wyniku uderzenia. Należy podkreślić, że delaminacja samodzielnie nie prowadzi do wyczerpania nośności konstrukcji, dopiero w połączeniu z innymi formami zniszczenia [3].



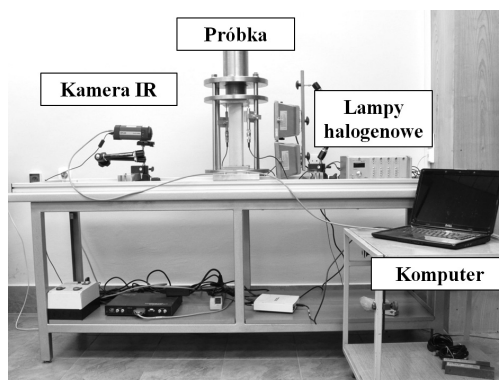
Rys. 3. Rodzaje delaminacji: a) zamknięta wewnątrz laminatu, b) na brzegu swobodnym

Fig. 3. Types of delamination: a) enclosed inside the laminate, b) on the edge

Ogólny podział wyniku procesu delaminacji rozróżnia dwa typy tego zjawiska: zawarty wewnątrz oraz na brzegu swobodnym laminatu (rys. 3). Ponadto każdy z wymienionych przypadków występowania delaminacji może być pojedynczy lub wielokrotny, symetryczny bądź niesymetryczny względem powierzchni środkowej laminatu [3, 10].

## 5. Badania eksperymentalne

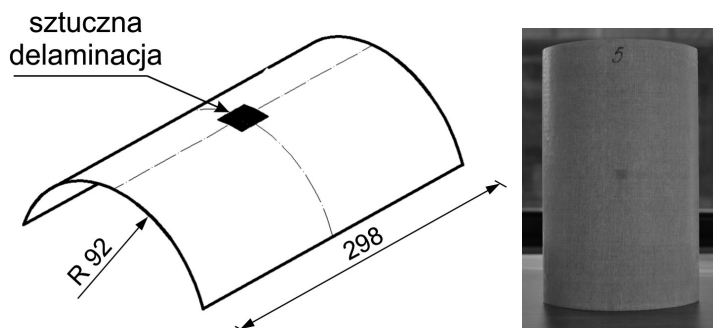
Badania doświadczalne wykonano za pomocą kamery termowizyjnej typu Flir A325 z oprogramowaniem IR-NDT. Kamera termowizyjna Flir A325 jest wyposażona w połączenie RJ-45 Gigabit Ethernet, dzięki któremu możliwe jest uzyskanie 16-bitowych obrazów o rozdzielczości  $320 \times 240$  przy częstotliwości 60 Hz i liniowych danych o temperaturze. Ponadto wyposażona jest w dwa zewnętrzne obiektywy: 10mm i 18mm, może wykonywać pomiary w zakresie temperatur od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $350^{\circ}\text{C}$  z dokładnością do  $0,07^{\circ}\text{C}$ . Działa w zakresie spektralnym od 7,5 do  $13,5 \mu\text{m}$ .



Rys. 4. Stanowisko do badań termograficznych

Fig. 4. Experimental set-up for thermography tests

W badaniach wykorzystano panel cylindryczny (GFRP) wykonany z ośmiu warstw tkaniny szklanej i żywicy epoksydowej o wymiarach: długość  $L = 298$  mm, promień  $R = 92$  mm i grubość  $T = 1,8$  mm – rys. 5. W celu wytworzenie sztucznej delaminacji pomiędzy czwartą i piątą warstwą w środkowej części umieszczono kwadratowe ( $10 \times 10$  mm) paseki teflonu o różnych grubościach: 0,2 mm, 0,7 mm i 1,2 mm.



Rys. 5. Obiekt badań: a) schemat cylindrycznej próbki z umiejscowioną sztuczną delaminacją, b) rzeczywisty widok panelu kompozytowego

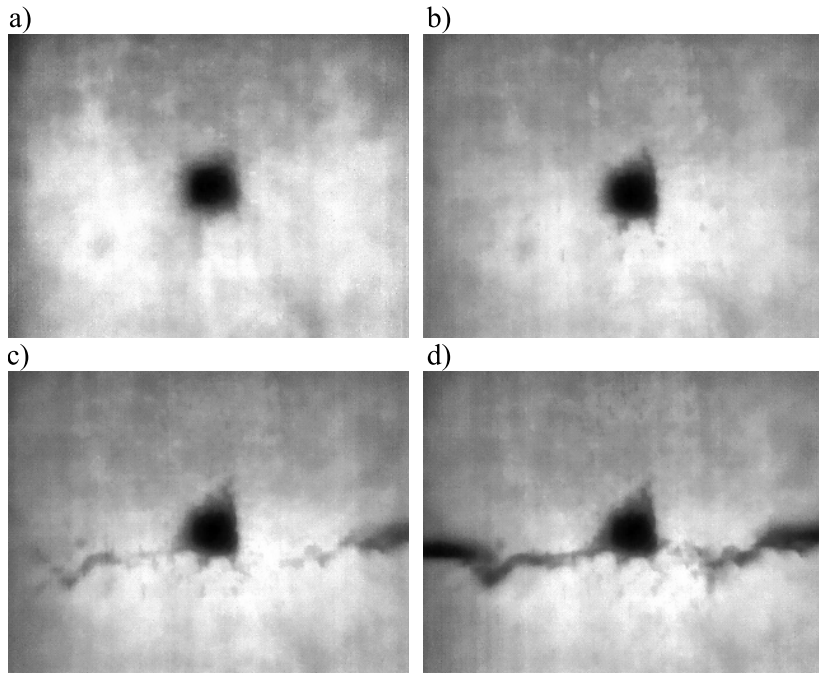
Fig. 5. Investigated object: a) scheme of cylindrical specimen with artificial delamination, b) real view of the composite panel

Analizy termograficzne przeprowadzono w temperaturze pokojowej i wilgotności powietrza nie przekraczającej 20%. Analizowana próbka były ogrzewana przez lampę halogenową o mocy 500 W. Budując stanowisko, zastosowano metodę dwustronną (transmisyjną), co znaczy, że próbka znajduje się pomiędzy kamerą a źródłem ciepła (rys. 4).

## 6. Wyniki badań

Pierwszym celem niniejszego artykułu było zaprezentowanie możliwości impulsowej termografii w podczerwieni w wykrywaniu i lokalizacji defektów występujących w materiałach kompozytowych. W 80% przypadków wynik jakościowy pozwala stwierdzić czy badany obiekt zostanie dopuszczony do dalszej eksploatacji lub opuści linię produkcyjną. Wyniki pierwszych testów jasno pokazują, że identyfikacja sztucznej nieciągłości materiału jest prosta i szybka do wykonania.

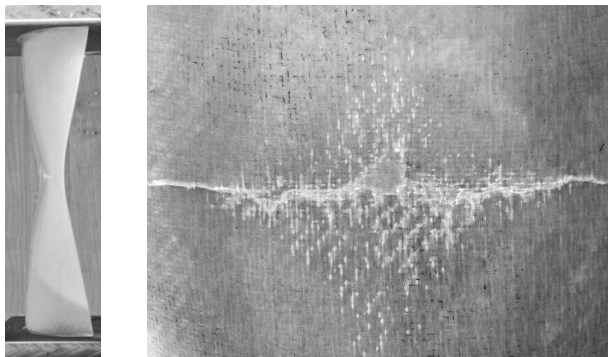
Kolejny etap badań jest związany z możliwością obserwacji rozwoju defektów podczas zmieniających się warunków obciążenia. Na rys. 6 zaprezentowano termogramy obrazujące propagację zniszczenia poprzecznie do badanej próbki podczas zmieniających się warunków obciążenia.



Rys. 6. Termogramy obrazujące rozwój zniszczenia cylindrycznej próbki kompozytowej podczas statycznej próby ściskania

Fig. 6. Thermograms presenting the development of the failure within the cylindrical composite samples during static compression tests

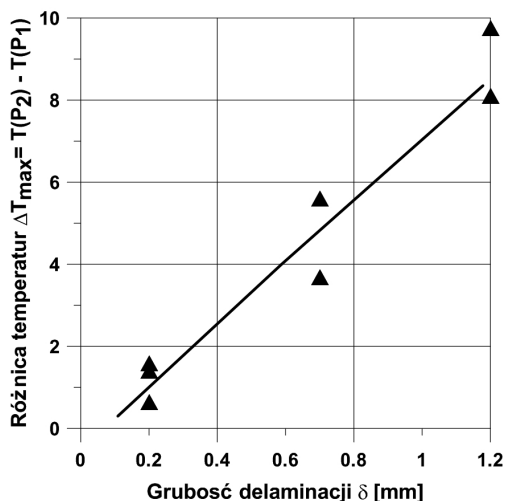
Sposób wyboczenia i forma zniszczenia zostały zaprezentowane na rys. 7. Warto zauważyć, że sztucznie wprowadzona deleminacja nie wpływa na sposób wyboczenia, jednak oddziałuje na ostateczne zniszczenie próbki.



Rys. 7. Sposób wyboczenia i finalnego zniszczenie badanej próbki

Fig. 7. Buckling mode and final failure of tested panels

Ponadto przeprowadzono analizę zależności grubości wprowadzonej sztucznie delaminacji (oznaczonej jako  $T_i$ ) w stosunku do zmian temperatury na powierzchni badanej próbki. Wyniki zaprezentowano na rys. 8.



Rys. 8. Różnice zmian temperatury dla różnych próbek

Fig. 8. Differences of temperature measured for various specimens

## 7. Wnioski

W artykule omówiono zagadnienia związane z technikami termografii w podczerwieni, promieniowaniem podczerwonym i formami zniszczenia struktur kompozytowych.

Zaprezentowane wyniki badań potwierdzają tezę, że badania nieniszczące wykorzystujące termografię w podczerwieni są bardzo efektywnym i skutecznym narzędziem w wykrywaniu i lokalizacji defektów podpowierzchniowych występujących w strukturach kompozytowych. Testy przeprowadzono na cylindrycznych panelach kompozytowych ze sztucznie wprowadzoną delaminacją w postaci kwadratowej folii Teflonowej o różnej grubości. Należy również zauważyć, że nie tylko geometria poszukiwanych defektów może być obserwowana, ale także ich rozwój. Ponadto zaobserwowano, że wprowadzona delaminacja nie rozwija się aż do finalnego zniszczenia, jednak ma wpływ na ostateczne uszkodzenie próbek. Kwestia oceny charakteru nieciągłości materiałowych pozostaje nadal otwarta i może być obiektem dalszych badań w tym kierunku.



## Literatura

- [1] Maldague X.P.V., *Theory and practise of infrared technology for nondestructive testing*, John Wiley, Interscience, New York 2001.
- [2] Krishnapillai M., Jones R., Marshall I.H., Bannister M., Rajic N., *Thermography as a tool for damage assessment*, Composite Structures 67, 2005, 149-155.
- [3] Muc A., Pastuszek P., *Zastosowanie materiałów kompozytowych w konstrukcjach i urządzeniach, Konstrukcje maszyn. Historia i perspektywy rozwoju*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011.
- [4] Muc A., *Mechanika kompozytów włóknistych*, Księgarnia Akademicka, Kraków 2003.
- [5] Ibarra-Castanedo C., *Quantitative subsurface defect evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth retrieval with the phase*, University Laval, 2005.
- [6] IR-NDT – Software Manual – Automotion Technology GmbH.
- [7] Świdorski W., *Metody i techniki termografii w podczerwieni w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych*, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, Biuletyn naukowy 112, 2009.
- [8] Breitenstein O., Warta W., Langenkamp M., *Lock-in Thermography. Basics and use for evaluating electronic devices and materials*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- [9] Oliferuk W., *Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń*, Biuro Gamma, Warszawa 2008.
- [10] Doliński Ł., *Porównanie wybranych modeli delaminacji w kompozytach warstwowych*, Modelowanie Inżynierskie 32, Gliwice 2006, 113-118.
- [11] Pastuszek P.D., Muc A., *Methods of infrared non-destructive techniques: review and experimental studies*, Key Engineering Materials, 2012 (w druku).
- [12] Muc A., Pastuszek P.D., *Prediction of subsurface defects through a pulse thermography: experiments vs. numerical modelling*, Proceedings of 15th European Conference on Composite Materials, Venice – Italy 2012.



RAFAŁ PILECKI\*

## ZASTOSOWANIA NAZIEMNEGO SKANERA LASEROWEGO

---

### THE USE OF GROUND-BASED LASER SCANNER

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania naziemnego skanera laserowego do badania deformacji powierzchni terenu. Omówiono zasadę działania i obszary zastosowań tej technologii. Podano przykłady zastosowania naziemnego skanera laserowego do wykrywania deformacji podłoża. Wyniki pomiarów oraz modele różnicowe z dwóch pomiarów można przedstawiać w obrazie 3D co pozwala na wnikliwą analizę wyników. Rozwój technologii skaningu laserowego daje nadzieję na lepszą analizę deformacji podłoża.

*Słowa kluczowe: deformacja terenu, skaner laserowy*

#### Abstract

The paper summarises methods of applying ground based laser scanners to study deformations of ground surface. Principle of operation and area of application for this technology were characterised. Examples how results of measure and differential models can be shown in 3D maps. The ongoing development of scanning technology allows to have hope for an even better results from ground deformations analysis in the future.

*Keywords: ground deformations, laser scanner*

---

\* Mgr inż. Rafał Pilecki, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej.

## 1. Wstęp

Bezpieczeństwo budownictwa jest ściśle związane ze stabilnym podłożem, na którym posadowione są obiekty. Jest to ważny problem dla obiektów istniejących i planowanych inwestycji. W artykule przedstawiono możliwości zastosowania naziemnego skanera laserowego do badania deformacji powierzchni terenu. Skanowanie laserowe wykonuje się także z samolotów systemem o nazwie LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Przy porównaniu obu technik najbardziej przekonującą zaletą teledetekcji naziemnej jest dokładność pomiarów. System LIDAR mierzy z dokładnością ok. 15 cm współrzędną wysokościową. W przypadku naziemnego skanera laserowego jest to precyzja ok. 5 mm. Producenci podają dokładne informacje o ich systemach. Na przykład RIEGL opisuje system LMS Z 360 o częstotliwości 8000 Hz, zasięgu 800 metrów i dokładności 5 mm. Natomiast ILRIS-3D, produkt Firmy OPTECH, posiada częstotliwość 2000 Hz, zasięg 800 metrów, dokładność 3 mm do odległości 100 metrów i 1–3 cm powyżej. Kolejnym przykładem jest system GS 200 stworzony przez MENSİ, który posiada częstotliwość 5000 Hz, zasięg 700 metrów oraz dokładność 3 mm na 100 metrów [7].

Naziemny skaner laserowy jest oparty na najnowocześniejszej technologii teledetekcji. Pomiar skanerem laserowym polega na wyemitowaniu wiązki światła koherentnego, która odbija się od obiektu i powraca do urządzenia. Wówczas pozyskana zostaje informacja o czasie przebiegu wiązki tam i z powrotem oraz o kątach poziomym i pionowym do obiektu względem skanera. W kolejnym etapie obliczone zostają współrzędne przestrzenne każdego punktu. Dokładność tej metody wynika z błędu położenia punktu i jest rzędu kilku milimetrów. Zasada działania impulsowego naziemnego skanera laserowego opiera się na rejestracji w ciągu sekundy dużej liczby punktów (od 1000 do 500 000), które nazywamy „chmurą” punktów. Chmura punktów stanowi rodzaj dokumentacji przestrzennej, do której możemy w każdej chwili wrócić, aby wykonać dodatkowe pomiary, analizy lub odtworzyć stan z dnia wykonania skanu. Z pomiarów przestrzennych przeprowadzonych w terenie za pomocą oprogramowania można otrzymać model terenu 3D. Deformacje terenu można śledzić na podstawie modelu różnicowego konstruowanego w oparciu o dwa lub więcej przestrzennych modeli. W procesie przetwarzania danych pomierzone punkty mogą być także użyte do opracowania przekrojów, rzutów, rysunków wektorowych. Proces skanowania laserowego polega na automatycznym pomiarze, charakteryzującym się bardzo wysoką częstotliwością próbkowania – pomiaru przestrzennego (3D) – rzędu dziesiątek, a nawet setek tysięcy punktów na sekundę w czasie rzeczywistym. W wyniku pomiaru otrzymujemy quasi-ciągłe odwzorowanie otaczającej przestrzeni reprezentowanej przez punkty, z których każdy ma określone współrzędne  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . W przypadku zastosowania dodatkowo kamery lub aparatu cyfrowego można rejestrować składowe RGB mierzonych obiektów, nanosząc je w procesie obróbki na zeskanowane punkty i tworząc dodatkowe barwne tekstury, wiernie odwzorowujące rzeczywiste kolory obiektu.

## 2. Obszary zastosowań skanowania laserowego

Obszary zastosowań skanerów laserowych są bardzo szerokie i wraz z rozpowszechnianiem się tej technologii pomiarowej pojawiają się coraz to nowe dziedziny, w których znajduje ona zastosowanie. Szerokie spektrum możliwości zastosowania jest jedną z podsta-

wowych zalet skanera laserowego – i tak w zależności od typu (zasięgu, dokładności) skanera – może być wykorzystywany począwszy od inżynierii materiałowej, aż do zastosowań w tworzeniu modeli 3D powierzchni ziemi. Przykładowe obszary zastosowania skanowania laserowego 3D to inwentaryzacja architektoniczna, w tym inwentaryzacja obiektów zabytkowych, wizualizacje 3D miast i budynków, wirtualne wycieczki. Dużą popularnością wśród użytkowników Internetu cieszą się wirtualne wycieczki po interesujących obiektach. Można w ten sposób, nie wychodząc z domu, zapoznać się np. z przyszłą uczelnią, poznać interesujące zabytki itp. Poniżej przedstawiono, przykład inwentaryzacji Łazienek Królewskich w Warszawie (rys. 1).



Rys. 1. Inwentaryzacja Łazienek Królewskich w Warszawie [8]

Fig. 1. Inventory of Royal Łazienki in Warsaw

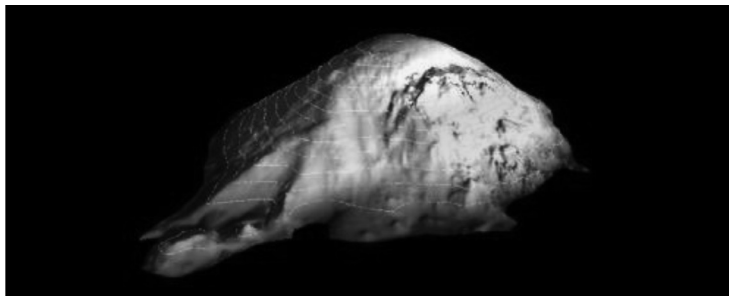
Drugim ogromnym obszarem zastosowań skanera laserowego jest inwentaryzacja przemysłowa, m.in. inwentaryzacja przewodów napowietrznych, monitoring mostów, monitoring tuneli. Jednym z zastosowań naziemnego skanera laserowego jest monitorowanie stanu mostów [6]. Autor podał kilka przykładów, w tym możliwość rejestrowania uszkodzeń elementów mostu wywołanych m.in. przez erozję. Interesującym zastosowaniem skanera jest rejestracja stanu mostu po fali uderzeniowej wywołanej przez kontrolowany wybuch w bliskiej odległości od badanego mostu. Skanowanie laserowe zastosowano także do kontroli odkształceń elementów mostu obciążonego ciężkimi pojazdami. Dzięki milimetrowej rozdzielczości skanera można było zaobserwować miejsca odkształceń.



Rys. 2. Odkształcenia elementów mostu obciążonego ciężkimi pojazdami [6]

Fig. 2. Deformation of bridge elements loaded with heavy vehicles [6]

Pomiary skanerem laserowym znalazły zastosowanie w górnictwie odkrywkowym do określania objętości czerpanych zasobów oraz do określania objętości materiałów sypkich (kruszywa, węgiel, rudy). Pomiary wykonuje się też w celach inwentaryzacyjnych, np. inwentaryzacja hałd węgla (rys. 3). Tym sposobem można obliczyć objętość hałdy, nałożyć izohipsy na obiekt. Średnia wielkość błędu względnego obliczonej objętości nie przekracza 1% [10]. W górnictwie podziemnym wykorzystuje się także skaner laserowy do różnego rodzaju inwentaryzacji i pomiarów. Decydującą zaletą skanera laserowego w tym przypadku jest możliwość pomiarów bez oświetlenia.



Rys. 3. Wynik pomiaru skanerem laserowym hałdy węgla wraz z nałożonymi izohipsami [10]

Fig. 3. Result of laser scanner measurement of coal spoil tip with isopleths [10]

Skaner laserowy wykonuje pomiary bez ingerowania w badane środowisko i wykorzystuje się tę cechę w rekonstrukcji wypadków, katastrof budowlanych, dokumentacji miejsc wypadków (kryminalistyka) itp.

Interesującym przykładem pomiarów z zastosowaniem skanera laserowego jest wykrywanie zmian w czasie przez ponowny pomiar tych samych powierzchni. Szczególnie w przypadku deformacji w czasie powierzchni terenu, skaner laserowy jest nie do zastąpienia. Kilka przykładów monitorowania deformacji terenu przedstawiono poniżej (rodz. 3).

Skanowanie laserowe 3D to metoda pomiaru polegająca na przeniesieniu rzeczywistego kształtu trójwymiarowego obiektu do postaci cyfrowej. Skanowanie laserowe 3D obiektu przeważnie wykonuje się z kilku stanowisk w zależności od geometrii obiektu. Dzięki temu jest możliwość cyfrowego odtworzenia obiektu, stworzenia jego trójwymiarowego modelu bez tak zwanych cieni i martwych pól. Dokładność skanowania wynosi, w zależności od firmy produkującej skaner, od 2 do 50 mm. Z chmury punktów za pomocą odpowiedniego oprogramowania jest możliwość stworzenia wirtualnego, trójwymiarowego modelu skanowanego obiektu. Otrzymane z procesu skanowania punkty można dalej opracowywać, w zakresie:

- orientacji chmury punktów z wszystkich skanów do jednego układu współrzędnych;
- budowy trójwymiarowego modelu CAD;
- tworzenia rysunków 2D – rzutów, przekrojów, profili;
- tworzenia bazy danych łączącej grafikę 3D z elementami opisowymi;
- porównania stanu rzeczywistego z dokumentacją projektową.

### 3. Przykłady wykorzystania skaningu laserowego do wykrywania deformacji

Przykładów wykorzystania skaningu laserowego do wykrywania deformacji jest w literaturze światowej bardzo dużo. Poniżej przedstawiono kilka przykładów, które obrazują przydatność pomiarów skanerem laserowym w monitorowaniu zagrożenia deformacjami.

W artykule A. Abellán [2] przedstawiono wyniki badań z monitorowania podłoża skalnego w obszarze zabudowań. Badaniami objęto prawie pionowy, pięćdziesięciometrowy klif, na szczycie którego znajduje się wieś Castellfollit de la Roca (rys. 4). Obrywy skał powodują zagrożenie dla istniejących zamieszkałych domów. Przeprowadzone 9-krotne pomiary w ciągu 22 miesięcy pozwoliły ustalić dwa rodzaje występujących obrywów: pojedynczej kolumny bazaltowej ( $1,5 \text{ m}^3$ ) i grupy kolumn (od  $1,5$  do  $150 \text{ m}^3$ ). Porównanie poszczególnych etapów procesu pozwoliło na ustalenie stanu możliwego zaistnienia obrywu (rys. 5). Przeprowadzone pomiary masywu skalnego skanerem laserowym pozwoliły na lepsze poznanie występującego zjawiska.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów deformacji podłoża budynków skanerem laserowym w 2007 i 2008 roku. Kolor niektórych punktów wykazał przyrosty deformacji (skala co 10 cm), co pozwoliło na wskazanie miejsca obrywu. Miejsce drugiego obrywu jest w tym samym obszarze co pierwszego.

Na rysunku 6 przedstawiono poszczególne etapy odrywania się kolumn bazaltowych w podłożu klifowym.

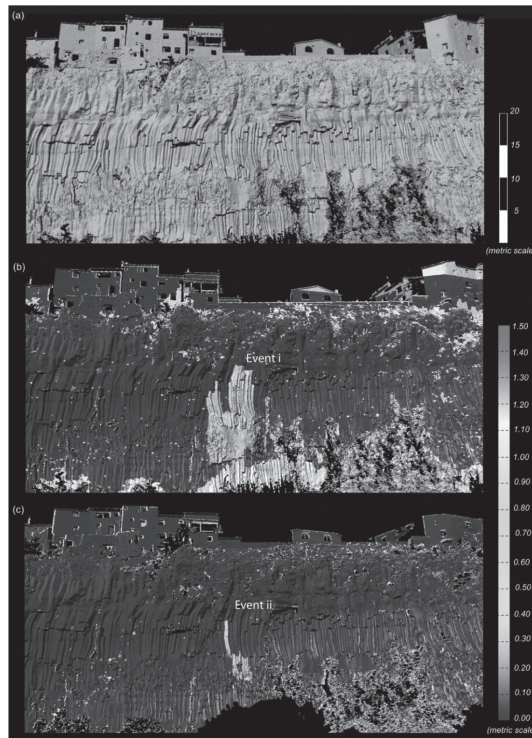
Naziemny skaner laserowy znalazł zastosowanie w geologii, np. do śledzenia przemieszczania się lodowców. Włoskie doświadczenia w tym zakresie opisali Danilo Godone i Franco Godone [3]. Pomiary przeprowadzono na lodowcu Belvedere we Włoszech (rys. 7). Wyniki badań z pomiarów osuwiska utworzonego z moreny czołowej od 8.01.2006 do 13.09.2006 wskazują na przemieszczanie się mas średnio o ponad 2 m (rys. 8), ze średnią prędkością 0,05 m/dzień. Zmierzono także całkowite przemieszczenie pionowe osuwiska (rys. 9). Przemieszczanie się lodu i mas skalnych spowodowane jest siłą ciężkości i nasila się w miarę ocieplania klimatu. Zjawisko to jest groźne szczególnie po obfitych opadach i może zagrażać pobliskim miejscowościom, np. Macugnaga. Zjawiska takie zdarzyły się: 3 sierpnia 1970, 2 sierpnia 1978 i w lipcu 1979, ostatnie z nich poważnie uszkodziło wyciąg krzesełkowy na lodowcu Belvedere, prawie osiągając Pecetto – osadę w pobliżu Macugnaga. Ważne jest zatem obserwowanie przemieszczeń mas lodu na lodowcach oraz obserwacja osuwisk w rejonach moren czołowych, aby nie dać się zaskoczyć przez gwałtowniejsze zjawiska. W tym zakresie wykorzystanie pomiarów naziemnym skanerem laserowym wydaje się zasadne.



Rys. 4. Bazaltowy klif na którym znajduje się Castellfollit de la Roca [2]

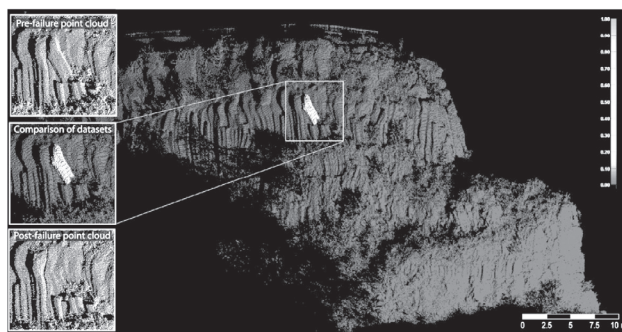
Fig. 4. Basalt cliff of the Castellfollit de la Roca [2]





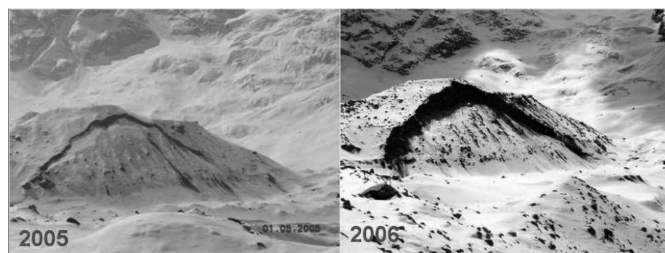
Rys. 5. (a) Powierzchnia masywu skalnego, gdzie miały miejsce obrywy I i II; (b) porównanie stanów z marca i kwietnia 2007; (c) porównanie stanów z października 2007 r. ze styczniem 2008

Fig. 5. (a) Surface of the rock, where rock falls I and II happened; (b) comparison of situation from March and April 2007; (c) comparison of situation from October 2007 and January 2008



Rys. 6. Porównanie kolejnych zestawów danych pomiarowych. Każdy punkt chmury punktów jest w kolorze zgodnie ze zmianami deformacji zarejestrowanymi w okresie porównania (wrzesień i grudzień 2006). Obryw jednej kolumny bazaltowej jest widoczny

Fig. 6. Comparison of next measurement data sets. Each point of point cloud is coloured according to recorded change of deformation in period between September and December 2006. Fall of one of basalt columns fall is visible



Rys. 7. Etapy powstawania osuwiska na morenie czołowej lodowca Belvedere [9]

Fig. 7. Stages of landslide creation on terminal moraine of Belveder glacier [9]



Rys. 8. Wyniki przemieszczenia osuwiska utworzonego z moreny czołowej lodowca Belvedere otrzymane z dwóch pomiarów skanerem laserowym [3]

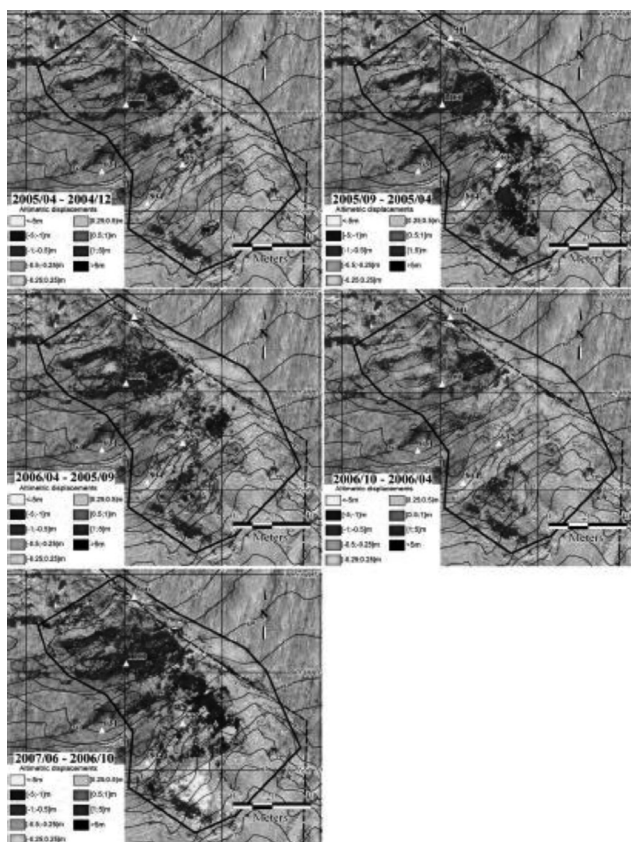
Fig. 8. Results of the displacement of landslide made from Belveder glacier terminal moraine. Received from two laser measurements [3]



Rys. 9. Pomiar całkowitego przemieszczenie osuwiska utworzonego z moreny czołowej lodowca Belvedere [3]

Fig. 9. Measure of the total displacement of the landslide made from Belveder glacier terminal moraine [3]

Pomiary naziemnym skanerem laserowym stosuje się do monitorowania osuwisk zarówno typowych skarp i zboczy zboczy, jak i zagrożonych kombinacją ruchów masowych, np. zsuwu i obrywów skalnych. Zaletą skanowania laserowego jest możliwość skanowania w miejscach niedostępnych. W artykule [5] pokazano możliwości zastosowania skaningu laserowego do monitoringu aktywnego osuwiska Séchilienne we francuskich Alpach. Osuwisko to stanowi zagrożenie dla ludzi i dla drogi RD1091. Monitoring objął lata 2004–2007, a wyniki pokazano na rysunku 10.



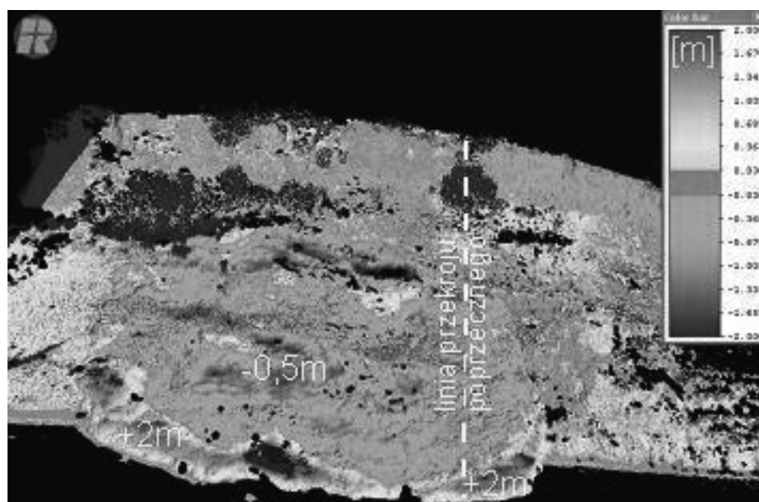
Rys. 10. Dynamika zsuwu osuwiska Séchilienne [5]

Fig. 10. Dynamics of Séchilienne landslide displacements [5]

Skanowanie osuwisk naziemnym laserem rozwija się w wielu państwach, w tym także we Włoszech, Holandii, USA oraz w Japonii, która ma bardzo dużo aktywnych osuwisk, w tym po trzęsieniach Ziemi [1].

W 2010 roku Państwowy Instytut Geologiczny – Instytut Badawczy wykonywał z bardzo dobrym rezultatem próby zastosowania tej technologii na osuwisku na klifie w Jastrzębiej Górze. Badania przeprowadzone skanerem laserowym wykazały maksymalne przesunięcia rzędu 0,5 m; maksymalne przesunięcie czoła osuwiska wyniosło 8 m, a jego wysokość osiągnęła maksymalnie 2 m (rys. 11).





Rys. 11. Dynamika osuwiska w Jastrzębiej Górze (30.04–30.06.2010 r.) [11]

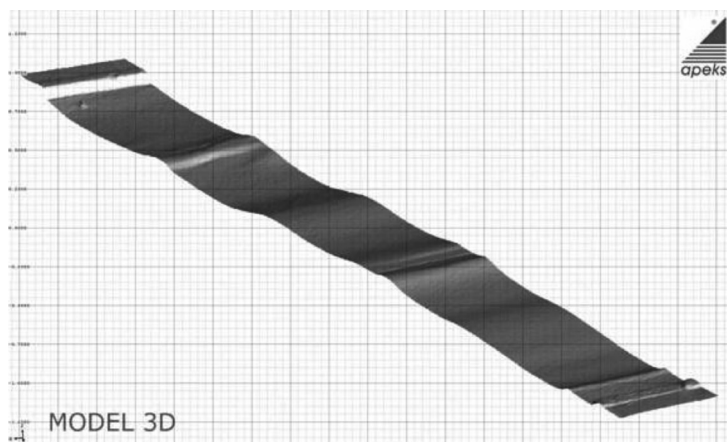
Fig. 11. Dynamics of landslide in Jastrzebia Góra (30.04–30.06.2010) [11]

Naziemny skaning laserowy znalazł zastosowanie także w inżynierii drogowej. Firma Apeks wykonała skanowanie laserowe odcinka ulicy Słowackiego w Gdańsku (rys. 12). Pomiar zrealizowano bez blokowania ruchu samochodowego. Na podstawie danych pomiarowych utworzono precyzyjny model 3D jezdni asfaltowej (rys. 13). W oparciu o szczegółowy model przeprowadzono analizę deformacji (rys. 14). Z analizy tej wynika, że największe deformacje ulicy są w jej górnej części. Takie analizy mogą być pomocne w podejmowaniu decyzji remontowych na drogach.



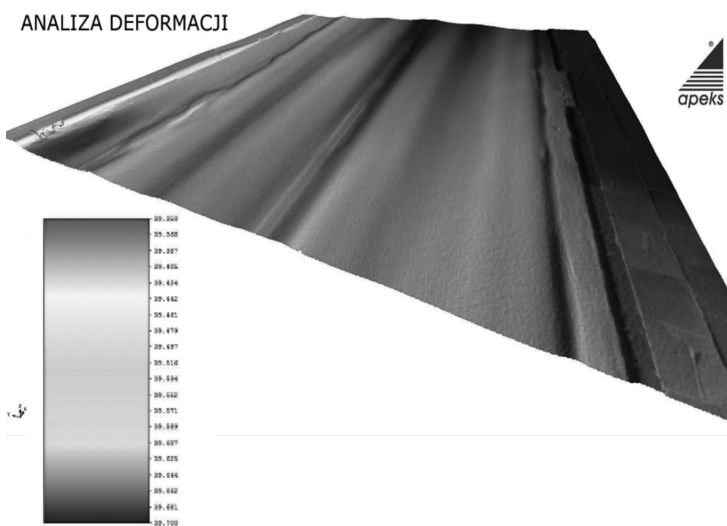
Rys. 12. Laserowy obraz odcinka ul. Słowackiego w Gdańsku [10]

Fig. 12. Laser image of Słowackiego street in Gdańsk [10]



Rys. 13. Model 3D odcinka ul. Słowackiego w Gdańsku [10]

Fig. 13. 3D model of Słowackiego street in Gdańsk [10]



Rys. 14. Analiza deformacji odcinka ul. Słowackiego w Gdańsku [10]

Fig. 14. Analysis of Słowackiego street in Gdańsk deformations [10]

#### 4. Podsumowanie

Technika skaningu laserowego jest w ostatnich latach dynamicznie rozwijającą się technologią. Pozwala ona w szybki i dokładny sposób zarejestrować przestrzennie obiekty. Można za jej pomocą monitorować procesy w przestrzeni i czasie z milimetrową dokładnością. Aktualnie nie ma alternatywy na tak precyzyjne pomiary powierzchni. W artykule przedstawiono obszary zastosowania naziemnego skanera laserowego oraz wybrane przykłady

badań deformacji powierzchni terenu. Nowoczesne oprogramowanie pozwala z pomiarów skanerem laserowym tworzyć modele przestrzenne a następnie uzyskać przekroje i warstwy. Stwarza to nowe możliwości badań i poznawania dynamiki deformacji w czasie. Technika skaningu laserowego może w powiązaniu z innymi technikami pomiaru deformacji powierzchni terenu przyczynić się do poznawania i zapobiegania procesom, które te deformacje powodują.

## Literatura

- [1] Asano H., *Measurement of Landslide Movement with 3D Laser Scanner*, Erosion and Sediment Control Research Group Public Works Research Institute, <http://linux01.crystalgraphics.com/view/>.
- [2] Abellán A., Vilaplana J.M., Calvet J., García-Sellés D., Asensio E., *Rockfall monitoring by Terrestrial Laser Scanning – case study of the basaltic rock face at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain)*, Natural Hazards and Earth System Sciences An Open Access Journal of the European Geosciences Union, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 2011, 829-841.
- [3] Godone D., Godone F., *The Support of Geomatics in Glacier Monitoring: The Contribution of Terrestrial Laser Scanner in Laser Scanner Technology Edited by J. Apolinar Munoz Rodriguez*, 258.
- [4] Grabowski D., Bagińska A., *Uwaga zagrożenie osuwiskiem*, Folder PIG-IB, Warszawa 2010.
- [5] Kasperski J., Delacourt C., Allemand P., Potherat P., Jaud M., Varrel E., *Application of a Terrestrial Laser Scanner (TLS) to the Study of the Séchilienne Landslide (Isère, France)* Remote Sens. 2010, 2(12), 2010, 2785-2802.
- [6] Shen-En-Chen, *Laser Scanning Technology for Bridge Monitoring in Laser Scanner Technology Edited by J. Apolinar Munoz Rodriguez*, 2012, 258.
- [7] Staiger R., *Terrestrial Laser Scanning Technology, Systems and Applications*, 2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco 2003.
- [8] <http://www.3deling.pl>
- [9] <http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr>
- [10] <http://www.apeks.com.pl>
- [11] <http://www.pgi.gov.pl/attachments/article/2812/monitoring.pdf>



KINGA PODBIERA-MATYSIK, KATARZYNA GORAZDA, ZBIGNIEW WZOREK\*

## EFEKTYWNOŚĆ OCZYSZCZENIA ŚCIEKÓW POCHODZĄCYCH Z MYJNI SAMOCHODOWEJ

---

### EFFICIENCY OF TREATMENT OF WASTEWATER FROM CARWASH

#### Streszczenie

Mimo iż woda zajmuje 75% naszego globu, to nie jest ona źródłem niewyczerpalnym. Szacuje się, że zapotrzebowanie na wodę rośnie szybciej niż wzrost liczby ludności. Myjnie samochodowe nie tylko wykorzystują ogromne ilości wody, ale produkują przy tym spore ilości ciekłych odpadów. W niniejszym artykule omówiono skutki zanieczyszczeń wody, rodzaje ścieków i sposoby ich oczyszczania. Zbadano sprawność działania podczyszczalni na podstawie analiz fizycznych oraz chemicznych. Otrzymane wyniki porównano z dopuszczalnymi stężeniami określonymi w rozporządzenia Ministra (Dz. U. 2009 Nr 27 poz. 169).

*Słowa kluczowe: ścieki, oczyszczalnia ścieków, myjnia samochodowa, ChZT*

#### Abstract

Although water occupies 75% of our globe, it is not an inexhaustible source. It is estimated that demand for water is growing faster than population growth. Carwashes not only consume significant amounts of water but at the same time produce large quantities of liquid waste. The article presents effects of water pollution, types of wastewater and methods of its cleaning. The efficiency of sewage-pre-treatment plant on the basis of physical and chemical analysis was analyzed. The results were compared with the acceptable levels specified in the Ordinance of the Minister (Dz. U. 2009 Nr 27 poz. 169).

*Keywords: wastewater, sewage-treatment plant, car wash, COD*

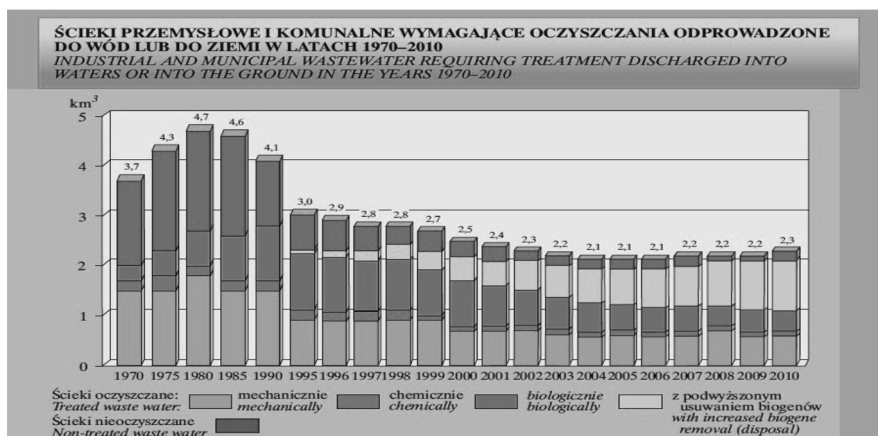
---

\* Mgr inż. Kinga Podbiera-Matysik, dr inż. Katarzyna Gorazda, dr hab. inż. Zbigniew Wzorek, prof. PK, Instytut Chemii i Technologii Nieorganicznej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Ciągły wzrost ludności, a z nim rozwój cywilizacyjny spowodowały gwałtowny wzrost miast i osiedli mieszkaniowych, a co za tym idzie wzrost liczby mieszkańców i zapotrzebowania na wodę. Wykorzystywana jest ona nie tylko do spożycia, ale przede wszystkim w celach gospodarczo-bytowych.

Wszecchobecna woda w naszym życiu: w rolnictwie, przemyśle czy życiu codziennym nie jest źródłem niewyczerpanym. Złudne okazuje się przekonanie, że mamy jej pod dostatkiem, gdyż pomimo tego iż woda zajmuje 75% naszego globu, to jedynie 2,5% stanowią wody słodkie, z czego aż 80% uwięziona jest w lodowcach lub tworzy wody podziemne [1]. Procesy odsalania wody słonej są na tyle kosztowne i energochłonne, że stają się nieopłacalne i stosowane są jedynie w tych krajach, gdzie zachodzi taka konieczność ze względu na brak dostępu do wody słodkiej. Coraz częściej stosuje się w wielu instalacjach ponowne użycie wody (recykl), jak np. w myjniach samochodowych, co pozwala nie tylko zminimalizować ilość powstających odpadów, ale również zaoszczędzić zużywaną wodę nawet do 40% [2]. Skład ścieków powstających przy myjni samochodowej jest bardzo zróżnicowany, gdyż poza wprowadzanymi detergentami zawierającymi środki powierzchniowo-czynne, natrafiać również można na substancje ropopochodne, smary, oleje, benzyny, pozostałości metali, części organicznych, sole i inne [3]. Substancje te w większości nie są podatne na rozkład biochemiczny, są trujące i szkodliwe w większych stężeniach. Ścieki odprowadzane do kanalizacji podlegają wstępnemu podczyszczeniu, aby nie spowodować zanieczyszczenia oczyszczalni (lub wód powierzchniowych) [4]. Ścieki oczyszczane mogą być metodami mechanicznymi, chemicznymi, biologicznymi, lub mieszanymi. Sposób oczyszczania dobiera się ze względu na skład fizykochemiczny ścieków, mając na uwadze źródła ich powstawania. W Polsce następuje rozwój technologiczny oczyszczalni, gdyż coraz powszechniej pracują one nie według konwencjonalnych metod biologicznego oczyszczania, ale wykorzystując metody biologicznego oczyszczania z podwyższonym usuwaniem biogenów [5, 6] (rys. 1).



Rys. 1. Sposób oczyszczania ścieków przemysłowych i komunalnych w Polsce w latach 1970–2010 [5]

Fig. 1. Method of treatment of industrial and municipal waste in Poland in years 1970–2010 [5]

## 2. Wpływ zanieczyszczeń wód na środowisko

Zanieczyszczeniem wody nazywamy „niekorzystne zmiany właściwości fizycznych, chemicznych i bakteriologicznych wody, spowodowane wprowadzeniem w nadmiarze substancji nieorganicznych (stałych, płynnych i gazowych), organicznych, radioaktywnych, czy wreszcie ciepła, które ograniczają lub uniemożliwiają wykorzystanie wody do picia i celów gospodarczych [7]”.

Woda może być zanieczyszczona przez zasolenie, domieszki humusu czy żelaza lub wskutek prowadzonej działalności człowieka. Szczególnie niebezpiecznymi substancjami są środki ochrony roślin, związki metali ciężkich (miedź, ołów, rtęć, cynk, kadm, nikiel i inne), związki siarki czy toksyczne rozpuszczalniki [3, 8].

Wskutek zanieczyszczenia rzek obniża się stopień samooczyszczenia danego akwenu, a więc wszystkich procesów zmierzających do rozkładu związków organicznych. Silne zanieczyszczenie wód może doprowadzić do skażenia oraz wymierania zwierząt tam żyjących i zaniku roślinności.

Gdy do zbiornika wodnego dostaną się ścieki pochodzące z nawożenia gruntów lub inne z przetwórstwa spożywczego czy chemicznego, następuje gwałtowny proces wzbogacenia tego zbiornika o substancje pokarmowe, zaburzona zostaje równowaga ekologiczna, a co za tym idzie – gwałtowny rozrost roślinności wodnej i drobnoustrojów w danym akwenu [9]. Wskutek zakwitnięcia wody ubożęją w tlen, następuje stopniowe wymieranie organizmów tlenowych, zaciemnienie akwenu i obumieranie roślinności zanurzonej, która wydziela olejki eteryczne, nadające wodzie nieprzyjemny zapach i smak. Konsekwencją eutrofizacji jest stopniowe spłylenie akwenu aż do jego całkowitego zaniku [20].

## 3. Charakterystyka województwa małopolskiego

Według danych na rok 2011 w województwie małopolskim o powierzchni powyżej 15 tys. km<sup>2</sup> mieszka ponad 3 400 000 ludzi, z czego ponad 756 000 w mieście Kraków. Ponad 65% tej ludności jest w wieku produkcyjnym, a co się z tym wiąże – korzysta w dużej mierze z transportu, jakim są samochody [10, 11]. Również duża gęstość zaludnienia niesie za sobą znaczne zużycie wody i ilość powstających ścieków, a w konsekwencji silne obciążenie oczyszczalni działających na tych terenach.

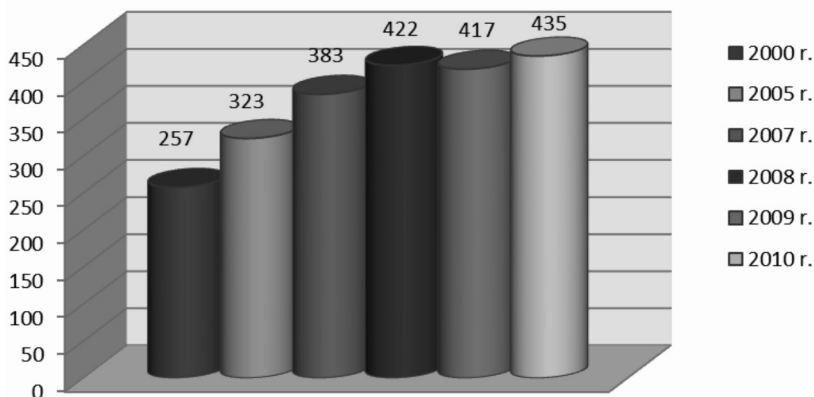
W województwie małopolskim w 2009 roku pracowało 9 oczyszczalni: 1 mechaniczna, 2 chemiczne i 6 biologicznych o łącznej przepustowości 2983 m<sup>3</sup>/d [5]. Wśród nich największymi oczyszczalniami, usytuowanymi po dwóch przeciwległych stronach Wisły są: Oczyszczalnia „Płaszów” i Oczyszczalnia „Kujawy”. Średniodobowe przepływy w 2009 roku w krakowskich oczyszczalniach wynosiły 217 337 m<sup>3</sup>/d, z czego Oczyszczalnia „Płaszów” przejmowała ponad 78% wszystkich ścieków [12].

### 3.1. Zmotoryzowanie mieszkańców

Jak podaje Rocznik statystyczny dla województw, w 2010 roku odnotowano 435 samochodów osobowych przypadających na 1000 osób [10], co daje niewyobrażalną liczbę pojazdów poruszających się po małopolskich drogach (rys. 2).

25 stycznia 2006 r. Rada Miasta Krakowa uchwaliła Regulamin utrzymania czystości i porządku na terenie miasta Krakowa, w którym w Rozdz. 2 Art. 3 pkt 1 widnieje zapis: „Mycie pojazdów samochodowych poza myjniami można przeprowadzić pod warunkiem, że ścieki po przejściu przez osadnik odprowadzane są do kanalizacji lub zbiorników bezodpływowych. Zabrania się odprowadzania ścieków bezpośrednio do zbiorników wodnych lub do ziemi” [13, 14]. Za niezastosowanie się do Regulaminu grozi mandat wystawiony przez Straż Miejską w wysokości nawet 500 zł.

Liczba samochodów osobowych przypadająca na 1000 mieszkańców woj. małopolskiego w latach 2000 - 2010



Rys. 2. Liczba samochodów osobowych zarejestrowanych w woj. małopolskim, przypadająca na 1000 mieszkańców. Dane na rok 2011 [10]

Fig. 2. Number of passenger cars registered in the province Malopolska per 1000 inhabitants. Data for 2011 [10]

Zauważalny jest wzrost zainteresowania usługami myjni automatycznych, a wraz z nim popyt na budowanie kolejnych punktów czy też unowocześnianie istniejących, których w samym Krakowie w 2010 roku zarejestrowano ponad 80.

#### 4. Uregulowania prawne

W celu ochrony środowiska naturalnego wprowadzono w życie ustawy, regulaminy oraz taryfikatory kar finansowych za przekroczenia dopuszczalnych stężeń, wśród których podstawowe znaczenie ma Dyrektywa Rady 76/464/EWG z 4 maja 1976 roku, w sprawie zanieczyszczenia spowodowanego przez niektóre niebezpieczne substancje odprowadzane do środowiska wodnego, jej późniejsze zmiany oraz dyrektywy i rozporządzenia z niej wynikające [8]. Stanowią one ujednoczenie dotychczasowych dokumentów do wymogów Unii Europejskiej.

21 maja 1991 roku Rada Wspólnot Europejskich ustaliła, iż niezbędne jest monitorowanie oczyszczalni ścieków i wód, do których odprowadzane są ścieki, oraz usuwania osadu w celu zapewnienia ochrony środowiska. Dodatkowo zachęcono do stosowania recyklingu,



a w obszarach szczególnie wrażliwych wymagane jest dokładniejsze oczyszczenie ścieków [4]. Państwa członkowskie należące do Unii Europejskiej zobowiązały się do wdrożenia zobowiązań wynikających z ww. Dyrektywy, wskutek czego w latach kolejnych wydano wiele rozporządzeń ministra środowiska, ministra budownictwa, które warunkują wprowadzenie ścieków do wód powierzchniowych jak i urządzeń kanalizacyjnych. Wśród nich decydujący wpływ ma ustawa z 18 lipca 2001 roku Prawo wodne [14], które zabrania wprowadzania do wód wszelkiego rodzaju odpadów i innych zanieczyszczeń, w tym również wskutek mycia pojazdów w pobliżu wód powierzchniowych i nad brzegami wód.

Dopuszczalne parametry ścieków określa Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 28 stycznia 2009 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi [19], natomiast obowiązki dostawców ścieków przemysłowych oraz warunki wprowadzenia ścieków do urządzeń kanalizacyjnych reguluje Rozporządzenie Ministra Budownictwa z dnia 14 lipca 2006 r. wydane na podstawie Ustawy z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzeniu ścieków [21]. Za przekroczenie warunków wprowadzania ścieków do wód lub do ziemi grozi kara, którą dyktuje Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 21 października 2010 r. [22].

## 5. Charakterystyka myjni – miejsca poboru próbek

Bezobsługowa myjnia samochodowa usytuowana jest w Krakowie, w bliskiej odległości od stacji benzynowej. Jest to jedna z najszybszych myjni, która na umycie i wysuszenie samochodu potrzebuje 2,5 minuty, co w konsekwencji daje 18 pojazdów umytych w ciągu godziny. Myjnia wykonuje cztery rodzaje mycia, zużywając przy tym cztery rodzaje różnych środków myjących i osuszaczy. Największa ilość zużywana jest podczas pełnego mycia, w skład którego wchodzi mycie wstępne, aktywna piana, woskowanie na zimno i mycie podwozia [23].

Myjnia ta, połączona jest bezpośrednio z systemem recyrkulacji, uzdatniania wody AquaPur®. Obieg zamknięty jest w pełni zabezpieczony przed przedostaniem się wody obiegowej do sieci poprzez zastosowanie elektrozaworów. Wykonawca zapewnia również 100% odzysk wody dzięki metodzie flokulacji, a także przy wykorzystaniu kombinacji czterech procesów: adsorpcji i sedymentacji, fermentacji z użyciem bakterii tlenowych oraz filtrowania przez filtr z piaskiem kwarcowym [24].

### 5.1. Cykl pracy myjni

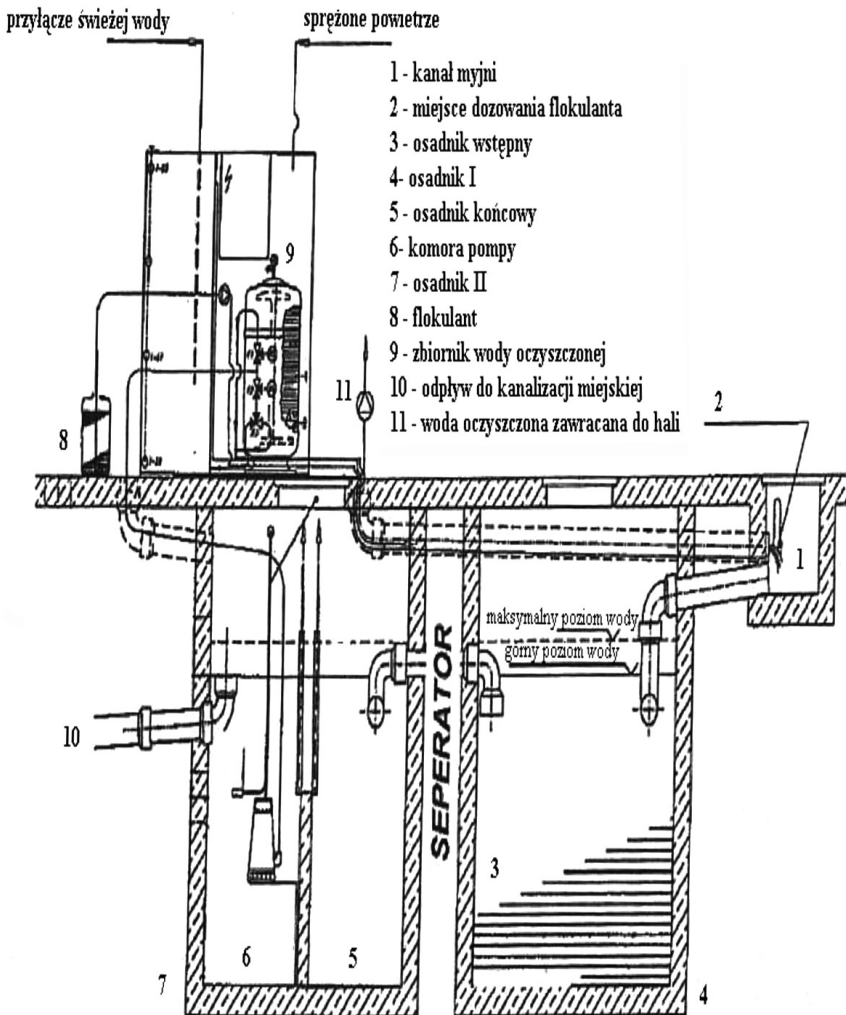
Woda zużyta w procesie mycia samochodu wpływa najpierw do kanału myjni na hali. Zawiera ona duże ilości detergentów użytych podczas mycia, soli, olejów, smarów i innych substancji spłukanych z samochodów. Już na początkowym etapie spływu ścieków dozowany jest flokulant, mający na celu wytworzenia większych aglomeratów z drobnych zawiesin i zmętnień. Podczas jednorazowego mycia pojazdu podawane jest od 30 do 40 g flokulantu.

Powstały ściek zmieszany ze środkiem flokującym absorbuje tlen z powietrza i trafia do osadnika I gdzie następuje reakcja wytrącania.

Przelewowo ściek przepływa w osadnika I (osadnik wstępny) do osadnika II (osadnik końcowy), gdzie po końcowej sedymentacji przepływa przez sita do komory z pompą zainstalowaną pracującą 24 h/d, aby zapobiec przykrym zapachom. Zapewnia to również sta-

łą cyrkulację wody z komory pompy, która przepływa następnie przez filtr kwarcowy do 420-litrowego zbiornika wody oczyszczonej i z powrotem przez przelew do kanału myjni. Dzięki temu procesowi w okresie zmniejszonego użytkowania myjni, np. nocą zawartość substancji niepożądanych zmniejsza się, gdyż ścieki kilkakrotnie przechodzą przez procesy oczyszczania.

Zastosowany filtr z wypełnieniem z piasku kwarcowego jest regenerowany przez płukanie wsteczne, które wypłukuje zatrzymane przez filtr cząsteczki zanieczyszczeń, po którym następuje formowanie łoża filtrującego. Woda z płukania jest następnie odprowadzana do osadnika I.



Rys. 3. Schemat instalacyjny systemu uzdatniania wody na badanej oczyszczalni [25]

Fig. 3. Installation diagram of a water treatment system for tested wastewater plant [25]

Oczyszczona woda, która znajduje się w zbiorniku, podawana jest do wstępnego opłukania samochodu jako dodatek do aktywnej piany oraz do płukania szczotek. Do nałożenia wosku oraz ostatecznego spłukania samochodu stosowana jest świeża woda wodociągowa, której średnio zużywa się od 8 do 20 litrów. Szacuje się, że około 5 litrów odparowuje lub „wywożone” jest na samochodzie. Pozostała część, czyli nadmiar wody w obiegu, a także woda używana do mycia samego pomieszczenia i portalu myjni trafia przelewowo z ostatniego osadnika do kanalizacji miejskiej przy użyciu elektrozaworu, który reguluje poziom wody (rys. 3) [25].

## 5.2. Środki chemiczne stosowane w myjni samochodowej

Wśród środków chemicznych stosowanych na myjni samochodowej (rys. 4) znajdują się środki powierzchniowo czynne: anionowe (np. sulfonian sodu alfa olefin, sulfonian dodecylbenzylowy), kationowe (mieszanina kationowych soli aminowych), niejonowe (np. etoksyfenol) wszelkiego rodzaju substancje zwiększające rozpuszczalność, inhibitory korozji, barwniki i aromaty (np. benzoesan benzylu, limonen, linalol, geraniol). Wśród nich znajduje się wiele substancji sklasyfikowanych jako niebezpieczne dla organizmów żywych i środowiska naturalnego (np. etanoloamina, Nitron A, izopropanol) [25].

Wszystkie związki powierzchniowo czynne mają szkodliwe działanie dla środowiska wodnego. Są powodem powstawania piany, która utrudnia pracę oczyszczalni ścieków, a w akwenach powoduje niedotlenienie ryb fauny i flory wodnej [3, 15]. Dodatkowym minusem zawartości surfaktantów w wodzie jest fakt, iż wymagają one tlenu do ich rozkładu, co prowadzi do zwiększenia chemicznego i biologicznego zapotrzebowania na tlen (ChZT, BZT).



Rys. 4. Środki używane podczas mycia pojazdów wraz z dozownikiem

Fig. 4. The chemicals used to wash vehicles with dispenser

## 6. Metodyka badań

Próbki do badań pobrane zostały w różnych odstępach czasowych i różnych warunkach pracy myjni:

I seria: próbki pobrane w sytuacji awaryjnej, tuż przed oczyszczeniem osadników przez specjalistyczną firmę. Próbki pobrane po sezonie zimowym (z początkiem marca 2011).

II seria: próbki pobrane po upływie dwóch tygodni od wyczyszczenia i opróżnienia osadników oraz pozostałych elementów oczyszczalni (w połowie marca 2011).

III seria: próbki pobrane po miesiącu od poboru serii II (w połowie kwietnia 2011). W okresie kilku dni przed poborem była pogoda deszczowa, co skutkowało zmniejszeniem liczby wykonywanych myć pojazdów.

Próbki pobierane były każdorazowo w czterech punktach, zgodnie z kierunkiem przepływu ścieków: osadnik I (wstępny), osadnik końcowy (sedymentacyjny), komora pompy, zbiornik wody oczyszczonej.

W dalszej części pracy używane będą oznaczenia:

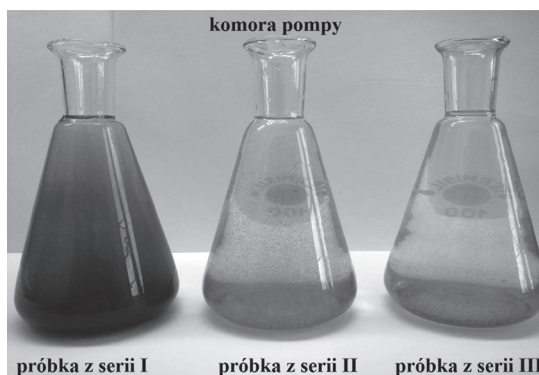
1a – próbka pobrana z osadnika I wstępnego (próbka z serii I)

2a – próbka pobrana z osadnika końcowego (próbka z serii I)

3a – próbka pobrana z komory pompy (próbka z serii I)

4a – próbka pobrana ze zbiornika wody oczyszczonej (próbka z serii I)

oraz analogicznie z indeksem b dla próbek z serii II, z indeksem c dla próbek serii III.



Rys. 5. Roztwory pobrane z komory pompy dla trzech serii badanych próbek

Fig. 5. Solutions collected from the pump chamber for three series of samples

### 6.1. Badania fizyczne

Ze względu na charakter miejsca poboru próbek do badań oraz faktu, iż powstają one wskutek pracy myjni samochodowej podjęto szereg badań fizycznych i chemicznych, mających na celu określenie jakości ścieku odprowadzanego do kanalizacji miejskiej.

Przeprowadzono badania fizyczne, a wśród nich:

- potencjał redukcjno-oksydacyjny – redox (przy zastosowaniu urządzenia Mera Tronik Typ N517, wyposażonego w elektrodę szklaną). Wartość potencjału daje zbliżoną informację o zawartości substancji redukujących i utleniających;

- barwa (określana metodą opisową dla barwy specyficznej);
- temperatura (mierzona w trakcie poboru za pomocą urządzenia wielofunkcyjnego CX-742);
- zapach (określany organoleptycznie w dwóch zakresach temperatur: 20°C oraz 40°C);
- zawiesiny łatwo opadające (mierzone za pomocą lejów Imhoffa) wykonano w czasie 5, 15, 30, 60, 90 i 120 min (rys. 6) [16].

## 6.2. Badania chemiczne

Wykonano badania chemiczne:

- odczyn – pH (mierzony urządzeniem wielofunkcyjnym CX-742 wyposażonym w elektrodę kalomelową);
- ChZT – chemiczne zapotrzebowanie tlenu (oznaczane metodą dwuchromianową wg normy PN-ISO 9408:1999). Metoda ta daje wysoki stopień utlenienia sięgający 90–100% wartości teoretycznej dla większości związków organicznych, jest metodą odtwarzalną [16];
- zawartość chlorków (oznaczane metodą Mohra wg normy PN-ISO 9297:1994);
- zawartość fosforu całkowitego – ze względu na niską koncentrację fosforanów w analizowanych próbkach konieczna była modyfikacja metody normowej oznaczania fosforu całkowitego (na podst. normy PN-88/C87015):  
Do kolby poj. 100ml pobrano 80ml przesączonej próbki (dla próbek I serii), zważono masę cieczy, uzupełniono do kreski. Następnie pobrano 25 ml roztworu do kolby poj. 50 ml, dodano 20 ml r-ru „D”, uzupełniono do kreski i po 15 minutach zmierzono absorbancję na spektrofotometrze Marcel Media przy długości fali 430 nm. W przypadku pozostałych próbek pobierano 95 ml analizowanej cieczy, zważono, uzupełniono do 100 ml i dalszy ciąg analizy wykonano jak powyżej [17];
- sucha pozostałość oraz pozostałość po prażeniu (oznaczane wg normy PN/C-04541:1978) pozwalają określić zawartość substancji lotnych w analizowanych próbkach oraz związków nieorganicznych rozkładających się w temperaturze prażenia [16];
- analiza termiczna TGA-DTA wykonana na urządzeniu TA Instruments SDT 2960 Simultaneous DTA-TGA, zakres temperaturowy 20°C/1min → 1000°C, zastosowano tygiel platynowy.

## 7. Wyniki badań

Wszystkie pobrane do analizy próbki nie były klarowne, a więc przed większością analiz należało je przesączyć (rys. 5).

### 7.1. Badania fizyczne

Ciemna barwa pobranych próbek okazała się być barwą pozorną, nadaną roztworowi przez znajdujące się w nim zawiesiny (rys. 5). Po przesączeniu roztworu stały się klarowne.

Badanie zapachu określono jako kwiatowy o niskiej intensywności. W podwyższonej temperaturze jest on bardziej wyrazisty – o umiarkowanej intensywności. Wszystkie próbki posiadają zbliżony zapach, uwarunkowany środkami stosowanymi do mycia pojazdów.

Na podstawie wartości potencjału redox stwierdzono, iż analizowane próbki wykazują jego niską wartość, co świadczy o dużej zawartości substancji redukujących, a więc o zanie-

czyszczeniu ścieków. Zauważalna jest również nieznaczna tendencja wzrostowa potencjału wraz z kolejnymi komorami osadczymi oczyszczalni (tab. 5) [16].

Podczas oznaczania zawiesin łatwo opadających (rys. 6) zauważono znacznie większą koncentrację zawiesin dla wszystkich próbek pobranych w pierwszej serii badań, sięgających blisko  $14 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ , co pozwala stwierdzić znaczne przeciążenie pracy podczyszczalni szczególnie w okresie zimowym. Podczas analizy kolejnych serii próbek wskaźnik ten zmniejszył się znacząco, dla przykładu zawartość zawiesin łatwo opadających dla próbki pochodzącej z komory osadnika zmniejsza się odpowiednio z  $13,8 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$  na  $0,45 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$  i ostatecznie spada do  $0,1 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ , co świadczy o poprawie pracy podczyszczalni. Wyniki dla pozostałych próbek umieszczono w tabeli 5.



Rys. 6. Oznaczanie zawiesin łatwo opadających w lejach Imhoffa

Fig. 6. Determination of suspended solids easily falling into hoppers Imhoff

## 7.2. Badania chemiczne

Pomiar odczynu pH wykonano zarówno w niesączonym ścieku, jak i po przesączeniu, a jego wartości zestawiono w tabeli 1. W przypadku próbek pobranych w sytuacji awaryjnej, a więc próbek I serii obserwuje się zwiększenie pH po przesączeniu, co daje podstawy do wniosku, iż oddzielony osad miał charakter kwasowy. Odczyn, jaki obserwuje się w pierwszej komorze osadnika (próbka 1a-c), minimalnie przekracza optymalne pH, które w sprawnym procesie koagulacji-flokulacji powinno zawierać się w granicach 6–7,4 (dla flokulanta na bazie aluminium) [25].

Oznaczanie chlorków potwierdziło wysoką ich koncentrację przede wszystkim w próbkach I serii sięgające  $1500\text{--}1600 \text{ mg Cl/l}$  (tab. 2), a stężenia te znacznie przekraczają dopuszczalną wartość określoną w Rozporządzeniu Ministerstwa Środowiska [19] (tab. 5). Zarówno wysoka wartość stężenia, jak i fakt, iż w poszczególnych komorach myjni obserwuje się jedynie nieznaczny ich spadek daje podstawy do wniosku, iż zastosowany sposób oczyszczania jest niewystarczający zwłaszcza w okresie zimowym, gdy ilość soli wwożona



na pojazdach jest znacznie większa niż w okresie wiosennym. Pomimo iż jony chlorkowe nie stanowią bezpośredniego zagrożenia dla środowiska naturalnego, to należy pamiętać i o tym, że skutek ich niedostatecznego usuwania kumulują się, co można zauważyć analizując ich stężenie w miejscu końcowego podczyszczania, jakim jest zbiornik wody oczyszczonej. Znaczna zawartość jonów chlorkowych przyczynić się może do korozji elementów myjni czy niszczenia karoserii samochodowej, gdyż woda ta służy głównie do mycia wstępnego pojazdów, stosowana jest do nakładania płynnego wosku na zimno oraz opłukiwania szczotek po myciu.

Oznaczenie fosforu całkowitego wykazało dwukrotnie wyższą zawartość fosforu całkowitego dla próbek pobranych w III serii. Zauważalna jest również tendencja spadkowa stężenia fosforu w poszczególnych etapach pracy podczyszczalni. Zaskakującym jest fakt, iż dla analizowanych próbek I serii, pobranych w momencie przeciążenia pracy oczyszczalni ładunkiem zanieczyszczeń, nie zauważa się wyraźnego wzrostu zawartości fosforu w ściekach. Wyniki umieszczono w tabeli 3.

Oznaczenie chemicznego zapotrzebowania tlenu (ChZT) pozwala zauważyć tendencję spadkową wraz z przechodzeniem ścieków przez kolejne etapy oczyszczania. Do najbardziej zanieczyszczonych ścieków zaliczyć można próbki z II i III serii, dla których wartości parametru ChZT znacznie przekraczają dopuszczalne stężenie określone w Rozporządzeniu Ministra (tab. 4).

Tabela 1

**Odczyn pH poszczególnych próbek z trzech serii pobranych w surowym ścieku oraz po przesączeniu**

| Próbka | Odczyn pH            |     |                 |     |
|--------|----------------------|-----|-----------------|-----|
|        | w niesączonym ścieku |     | po przesączeniu |     |
| 1a     | 7,4                  | 7,4 | 7,7             | 7,6 |
| 2a     | 7,3                  | 7,3 | 7,2             | 7,3 |
| 3a     | 7,0                  | 7,1 | 7,3             | 7,3 |
| 4a     | 7,2                  | 7,3 | 8,0             | 7,9 |
| 1b     | 7,4                  | 7,3 | 7,1             | 7,1 |
| 2b     | 7,2                  | 7,3 | 7,1             | 7,2 |
| 3b     | 7,2                  | 7,1 | 7,1             | 7,1 |
| 4b     | 7,3                  | 7,4 | 7,2             | 7,2 |
| 1c     | 7,5                  | 7,4 | 7,9             | 7,8 |
| 2c     | 7,2                  | 7,3 | 7,8             | 7,9 |
| 3c     | 7,3                  | 7,4 | 7,5             | 7,6 |
| 4c     | 7,3                  | 7,3 | 7,4             | 7,5 |

**Wyniki oznaczania stężenia jonów chlorkowych w poszczególnych próbkach trzech serii pobrań**

| Próbka | V AgNO <sub>3</sub><br>[ml] | V śr AgNO <sub>3</sub><br>[ml] | Stężenie [mg<br>Cl/l] |
|--------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1a     | 9,70                        | 9,63                           | 1563,5                |
|        | 9,60                        |                                |                       |
|        | 9,60                        |                                |                       |
| 2a     | 9,60                        | 9,70                           | 1574,9                |
|        | 9,80                        |                                |                       |
|        | 9,70                        |                                |                       |
| 3a     | 9,70                        | 9,77                           | 1586,3                |
|        | 9,90                        |                                |                       |
|        | 9,70                        |                                |                       |
| 4a     | 10,3                        | 10,2                           | 1656,1                |
|        | 10,0                        |                                |                       |
|        | 10,1                        |                                |                       |
| 1b     | 4,50                        | 4,43                           | 719,30                |
|        | 4,40                        |                                |                       |
|        | 4,40                        |                                |                       |
| 2b     | 4,40                        | 4,37                           | 709,50                |
|        | 4,50                        |                                |                       |
|        | 4,40                        |                                |                       |
| 3b     | 4,40                        | 4,37                           | 709,50                |
|        | 4,40                        |                                |                       |
|        | 4,30                        |                                |                       |
| 4b     | 4,50                        | 4,40                           | 714,40                |
|        | 4,40                        |                                |                       |
|        | 4,30                        |                                |                       |
| 1c     | 2,35                        | 2,25                           | 365,30                |
|        | 2,20                        |                                |                       |
|        | 2,20                        |                                |                       |
| 2c     | 2,05                        | 2,08                           | 337,70                |
|        | 2,10                        |                                |                       |
|        | 2,10                        |                                |                       |
| 3c     | 2,05                        | 2,08                           | 337,70                |
|        | 2,05                        |                                |                       |
|        | 2,15                        |                                |                       |
| 4c     | 2,25                        | 2,25                           | 365,30                |
|        | 2,30                        |                                |                       |
|        | 2,20                        |                                |                       |



Tabela 3

**Zawartość fosforu całkowitego w poszczególnych próbkach z trzech serii pobrań**

| Próbka | Pobrana masa [g] | Stężenie [mgP/l] |
|--------|------------------|------------------|
| 1a     | 80,0096          | 0,112            |
| 2a     | 80,0253          | 0,104            |
| 3a     | 80,0064          | 0,063            |
| 4a     | 80,0323          | 0,063            |
| 1b     | 94,3560          | 0,151            |
| 2b     | 93,4910          | 0,121            |
| 3b     | 93,3502          | 0,149            |
| 4b     | 93,3013          | 0,149            |
| 1c     | 92,1256          | 0,230            |
| 2c     | 93,0455          | 0,186            |
| 3c     | 92,6871          | 0,204            |
| 4c     | 92,0908          | 0,166            |

Tabela 4

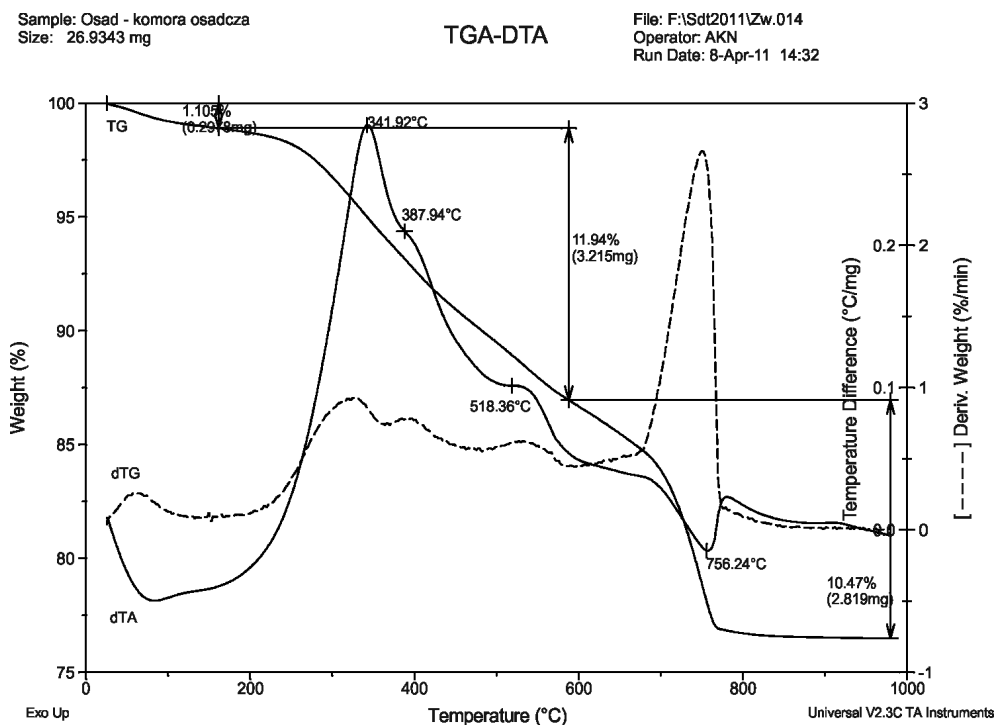
**Zawartość ChZT w poszczególnych próbkach z trzech serii pobrań**

| Próbka | ChZT [mg O <sub>2</sub> /l] |
|--------|-----------------------------|
| 1a     | 131,8                       |
| 2a     | 113,5                       |
| 3a     | 94,20                       |
| 4a     | 85,10                       |
| 1b     | 233,0                       |
| 2b     | 391,4                       |
| 3b     | 363,5                       |
| 4b     | 186,4                       |
| 1c     | 188,3                       |
| 2c     | 169,5                       |
| 3c     | 141,2                       |
| 4c     | 83,45                       |

Oznaczenie suchej pozostałości potwierdziło wyniki analizy ChZT i badanie zawiesin łatwo opadających. W większości przypadków otrzymane wyniki przekraczają dopuszczalne wartości stężeń (tab. 5), co świadczy o obciążeniu podczyszczalni ładunkiem zanieczyszczeń, oraz pośrednio o skuteczności zastosowanego koagulantu.

Wykonane oznaczenie pozostałości po prażeniu, dające ogólne wiadomości nt. ilości substancji mineralnych, które nie uległy rozkładowi wskutek prażenia, mimo iż nie zostało sklasyfikowane w rozporządzeniu [19], daje podstawy by wnioskować o dużym ładunku zanieczyszczeń w analizowanych próbkach. Stosunkowo mała różnica pomiędzy wartością pozostałości po prażeniu a suchej pozostałości świadczy o niskiej zawartości substancji organicznych i lotnych, rozkładających się w wysokiej temperaturze.

Dla potwierdzenia spostrzeżeń wykonano analizę TGA-DTA (rys. 7). Próbka poddana analizie pochodziła z wysuszonego osadu próbki 1a (osadnika wstępnego). Dzięki zastosowanej metodzie dostrzec można efekty termiczne towarzyszące rozkładowi analizowanej próbki: efekt egzotermiczny w temperaturze około 342°C, świadczący o rozkładzie zawartych związków organicznych, oraz efekt endotermiczny w temperaturze około 756°C, świadczący o rozkładzie węgla wapnia do tlenku wapnia (równoczesna największa różnica ubytku masy do czasu). W temperaturze ponad 800°C nadal pozostało ponad 75% wagowych próbki w postaci krzemionki [18].



Rys. 7. Wynik analizy termicznej dla osadu próbki 1a

Fig. 7. The result of thermal analysis for sediment sample

Zestawienie wyników przeprowadzonych analiz dla trzech serii pobrań próbek wraz z dopuszczalnymi wartościami wskaźników na podstawie Rozporządzenia Ministra Środowiska z 2009 r. [19]

| oznaczany parametr        | jednostka                        | miejsce poboru próbki <sup>1)</sup> | wyniki analizy dla I, II i III serii poboru próbek |          |           | dopuszczalne wartości wskaźników wg Rozporządzenia Ministra Środowiska <sup>4)</sup> | czy analizowana próbka nieści się w dopuszczalnej wartości? |          |           |     |     |     |
|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--|----------|-----------|--|---|----------|-----------|-----|-----|-----|
|                           |                                  |                                     | I seria  | II seria | III seria |  | I seria   | II seria | III seria |     |     |     |
| barwa                     | -                                | 1                                   | występowała barwa pozorna                          |          |           | nd <sup>2)</sup>   | TAK   | TAK      | TAK       |     |     |     |
|                           |                                  | 2                                   |  |          |           |  |   |          |           |     |     |     |
|                           |                                  | 3                                   |  |          |           |  |   |          |           |     |     |     |
|                           |                                  | 4                                   |  |          |           |  |   |          |           |     |     |     |
| redox                     | mV                               | 1                                   | -0073  | -0080    | -0080     | nd   | nd  | nd       | nd        |     |     |     |
|                           |                                  | 2                                   | -0051  | -0079    | -0076     |  |   |          |           |     |     |     |
|                           |                                  | 3                                   | -0033  | -0077    | -0076     |  |   |          |           |     |     |     |
|                           |                                  | 4                                   | -0029  | -0071    | -0061     |  |   |          |           |     |     |     |
| temperatura               | °C                               | 1                                   | 15 ± 10°C  |          |           | max 35°C   | TAK   | TAK      | TAK       |     |     |     |
|                           |                                  | 2                                   |  |          |           |  |   |          |           |     |     |     |
|                           |                                  | 3                                   |  |          |           |  |   |          |           |     |     |     |
|                           |                                  | 4                                   |  |          |           |  |   |          |           |     |     |     |
| zapach <sup>2)</sup>      | -                                | 1                                   | S / 2,3  | S / 2,3  | S / 2,3   | nd   | nd  | nd       | nd        |     |     |     |
|                           |                                  | 2                                   | S / 1,2  | S / 1,2  | S / 1,2   |  |   |          |           |     |     |     |
|                           |                                  | 3                                   | S / 1,2  | S / 1,2  | S / 1,2   |  |   |          |           |     |     |     |
|                           |                                  | 4                                   | S / 2,3  | S / 2,3  | S / 2,3   |  |   |          |           |     |     |     |
| zawiesiny łatwo opadające | cm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup> | 1                                   | 13,8   | 0,45     | 0,1       | max 0,5 cm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup>   | NIE   | TAK      | TAK       |     |     |     |
|                           |                                  | 2                                   | 3,7  | 1,5      | 1,5       |  |   |          |           | NIE | NIE | NIE |
|                           |                                  | 3                                   | 3,3  | 0,45     | 0,8       |  |   |          |           |     |     |     |
|                           |                                  | 4                                   | 0,0  | 0,0      | 0,0       |  |   |          |           |     |     |     |

Badania fizyczne

| <b>Badania chemiczne</b>     |                                   |   |         |        |        |  |             |               |        |
|------------------------------|-----------------------------------|---|---------|--------|--------|--|-------------|---------------|--------|
| odczyn <sup>3)</sup>         | pH                                | 1 | 2       | 3      | 4      | 6,5 ± 9,0                                    | TAK         | TAK           | TAK    |
| <b>ChZT</b>                  | mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup> | 1 | 7,47,6  | 7,47,1 | 7,57,9 | max 125<br>mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup> | NIE         | NIE           | NIE    |
|                              |                                   | 2 | 7,37,2  | 7,27,2 | 7,27,8 |  | TAK         | NIE           | NIE    |
|                              |                                   | 3 | 7,07,3  | 7,17,1 | 7,37,5 |  | TAK         | NIE           | NIE    |
|                              |                                   | 4 | 7,28,0  | 7,37,2 | 7,37,4 |  | TAK         | NIE           | TAK    |
| <b>chlorki</b>               | mgCl/dm <sup>3</sup>              | 1 | 131,8   | 233    | 188,3  | max 1 000<br>mgCl/dm <sup>3</sup>            | NIE         | TAK           | TAK    |
|                              |                                   | 2 | 113,5   | 391,4  | 169,5  |  | NIE         | TAK           | TAK    |
|                              |                                   | 3 | 94,2    | 363,5  | 141,2  |  | NIE         | TAK           | TAK    |
|                              |                                   | 4 | 85,1    | 186,4  | 83,45  |  | NIE         | TAK           | TAK    |
| <b>fosfor całkow.</b>        | mgP/dm <sup>3</sup>               | 1 | 1 563,5 | 719,3  | 365,3  | max 2 mgP/dm <sup>3</sup>                    | NIE         | TAK           | TAK    |
|                              |                                   | 2 | 1 574,9 | 709,5  | 337,7  |  | NIE         | TAK           | TAK    |
|                              |                                   | 3 | 1 586,3 | 709,5  | 337,7  |  | NIE         | TAK           | TAK    |
|                              |                                   | 4 | 1 656,1 | 714,4  | 365,3  |  | NIE         | TAK           | TAK    |
| <b>sucha pozostałość</b>     | mg/dm <sup>3</sup>                | 1 | 0,112   | 0,151  | 0,230  | 800 mg/dm <sup>3 5)</sup>                    | TAK         | TAK           | TAK    |
|                              |                                   | 2 | 0,104   | 0,121  | 0,186  |  | NIE         | NIE           | NIE    |
|                              |                                   | 3 | 0,063   | 0,149  | 0,204  |  | NIE         | NIE           | TAK    |
|                              |                                   | 4 | 0,063   | 0,149  | 0,166  |  | NIE         | NIE           | TAK    |
| <b>pozałość po przazaniu</b> | mg/dm <sup>3</sup>                | 1 | 7 258   | 1 544  | 994    | brak danych                                  | NIE         | NIE           | NIE    |
|                              |                                   | 2 | 3 876   | 1 774  | 850    |  | NIE         | NIE           | NIE    |
|                              |                                   | 3 | 3 662   | 1 624  | 564    |  | NIE         | NIE           | TAK    |
|                              |                                   | 4 | 3 106   | 1 548  | 548    |  | NIE         | NIE           | TAK    |
|                              |                                   | 1 | 6 276   | 1 418  | 844    | brak danych                                  | poмимо      | braku         | danych |
|                              |                                   | 2 | 3 738   | 1 580  | 686    |  | spodziewać  | się           | można  |
|                              |                                   | 3 | 3 390   | 1 566  | 482    |  | analogiczne | przekroczenia | jak    |
|                              |                                   | 4 | 3 010   | 1 510  | 478    |  | dla         | analizy       | suchej |

Objaśnienia:

<sup>1)</sup> 1 – osadnik I (wstępny); 2 – osadnik wtórny (końcowy); 3 – komora pompy; 4 – zbiornik wody oczyszczonej;

<sup>2)</sup> zapach: np. S/1,2 – zapach specyficzny, pierwsza wartość liczbową określa skalę zapachu w 20°C, druga wartość określa skalę zapachu w 40°C (skala 1 – zapach słabo wyczuwalny, 2 – zapach bardzo intensywny);

<sup>3)</sup> odczyn: pierwsza wartość liczbową – w ścieku niesączonym, druga wartość – w przesączonej próbce;

<sup>4)</sup> Rozporządzenie Ministra Środowiska „w sprawie warunków jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi”, Dz.U. z 2009 r. Nr 27 poz. 169 [19]

<sup>5)</sup> nd – nie dotyczy

## 8. Wnioski

Splukiwane z pojazdów zanieczyszczenia dostające się do badanej oczyszczalni nie zostają przez nią dostatecznie usunięte. Świadczą o tym wyniki wykonanych analiz: ChZT, suchej pozostałości, pozostałości po prażeniu, zawartości jonów chlorkowych czy zawartości zawiesin łatwo opadających. Również przepełnienie osadnika wstępnego znacząco wpływa na jakość oczyszczanych ścieków, wskutek czego zanieczyszczeniu ulegają kolejne komory, a w konsekwencji ścieki bogate w zawiesiny i nierozłożone związki organiczne dostają się do kanalizacji miejskiej. Zwiększony ładunek zanieczyszczeń zagraża zarówno środowisku naturalnemu, jak i pośrednio pracy komunalnej oczyszczalni ścieków.

Na uwagę zasługuje przede wszystkim przekroczona w ściekach zawartość stężenia jonów chlorkowych, zwłaszcza w okresie zimowym. Wpływ na ich stężenie ma zapewne ilość soli używana do posypywania dróg, która pozostaje na pojeździe i splukiwana jest wraz z pozostałymi zanieczyszczeniami do kanału myjni. Zastosowany sposób podczyszczenia nie powoduje ich usunięcia do wymaganego poziomu, dlatego koniecznym jest jego dostosowanie do aktualnych potrzeb.

Z analizy przedstawionych wyników można wnioskować, iż:

- ilość zawiesin łatwo opadających została znacznie przekroczona zwłaszcza wtedy, gdy nastąpiło przepełnienie osadnika wstępnego, przez co osad przedostał się do kolejnych komór zanieczyszczając je;
- parametr określający chemiczne zapotrzebowanie tlenu (ChZT) wykazuje tendencję spadkową dla kolejnych komór oczyszczalni, co świadczy o prawidłowej jej pracy, jednak parametr ten jest znacznie przekroczony w większości analizowanych próbek;
- analizowana zawartość chlorków jest zasadniczo przekroczona przede wszystkim dla próbek pobranych po okresie zimowym (I seria). Zaprojektowana oczyszczalnia wyraźnie nie jest przygotowana na oczyszczenie takiego stężenia jonów chlorkowych, gdyż ich zawartość wzrasta w kolejnych punktach przepływu ścieków;
- analiza fosforu dowiodła jego znikomą zawartość, co świadczy o odpowiednio dobranym flokulancie strącającym fosforany do postaci trudnorozpuszczalnego osadu;
- znacznie przekroczone wartości wskaźników suchej pozostałości zawiesin łatwo opadających oraz ChZT świadczą o dużym obciążeniu oczyszczalni ładunkiem zanieczyszczeń oraz pośrednio o skuteczności zastosowanego koagulantu.

## Literatura

- [1] *Cykl hydrologiczny*, Wikipedia, dostęp online <http://pl.wikipedia.org/>
- [2] Al-Odwani A., Ahmed M., Bou-Hamad S., *Desalination* 206 (2007) 17-28; *Carwash water reclamation in Kuwait*, 17 January 2006.
- [3] *Substancje niebezpieczne w ściekach z wybranych branż przemysłu chemicznego*, Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa 1999.
- [4] Dyrektywa Rady 91/271/EWG dot. oczyszczania ścieków komunalnych.
- [5] *Ochrona środowiska 2011*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2011, ([www.stat.gov.pl](http://www.stat.gov.pl)).

- [6] Ł o m o t o w s k i J., S z p i n d o r A., *Nowoczesne systemy oczyszczania ścieków*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1999.
- [7] *Publikacje – Rodzaje ścieków i ich typowe składniki*, <http://www.publikacje.hdwoa.pl/index.php>.
- [8] Dyrektywa Rady 76/464/EWG z 4 maja 1976 roku w sprawie zanieczyszczenia spowodowanego przez niektóre niebezpieczne substancje odprowadzane do środowiska wodnego.
- [9] L i v i n g s t o n R.J., *Eutrophication Processes in Coastal Systems: Origin and Succession of Plankton Blooms and Effects on Secondary Production in Gulf Coast Estuaries*, CRC Press, 2001.
- [10] *Rocznik Statystyczny Województw 2011*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2011, ([www.stat.gov.pl](http://www.stat.gov.pl)).
- [11] *Polska w liczbach 2012*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2012, ([www.stat.gov.pl](http://www.stat.gov.pl)).
- [12] Praca zbiorowa pod redakcją prof. dr hab. inż. Zbigniewa Heidricha, *Kierunki przeróbki i zagospodarowania osadów ściekowych*, Wyd. „Seidel-Przywecki”, Warszawa 2010.
- [13] Uchwała Rady Miasta Krakowa NR C/1011/06 z dnia 25 stycznia 2006 r. w sprawie utrzymania czystości i porządku na terenie Gminy Miejskiej
- [14] Ustawa z 18 lipca 2001 roku Prawo wodne (Dz.U. z 2001t r., Nr 115, poz. 1229 z póź. zm.)
- [15] Z i e l i Ń s k i R., *Surfaktanty*, Wyd. Akad. Ekon., Poznań 2000.
- [16] H e r m a n o w i c z W., D o j l i d o J. i i n., *Fizyczno-chemiczne badania wody i ścieków*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1999.
- [17] M a r c z e n k o Z., *Spektrofotometryczne oznaczanie pierwiastków*, PWN, Warszawa 1979.
- [18] S c h u l z e D., *Termiczna analiza różnicowa*, PWN, Warszawa 1974.
- [19] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 28 stycznia 2009 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi (Dz.U. z 2009 r., Nr 27, poz. 169)
- [20] *About Eutrophication*, World Resources Institute <http://www.wri.org/>.
- [21] Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 12 czerwca 2006 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (Dz.U. z 2006 r., Nr 123, poz. 858).
- [22] Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 21 października 2010 r. w sprawie wysokości stawek kar za przekroczenie warunków wprowadzania ścieków do wód lub do ziemi oraz za przekroczenie dopuszczalnego poziomu hałasu, na rok 2011 (M. P. 2010 Nr 78, poz. 965).
- [23] Dane wewnętrzne Stacji Paliw, niepublikowane.
- [24] Dane firmy wykonującej badaną instalację, niepublikowane.
- [25] Dokumentacja techniczno-ruchowa systemu recykulacji wody, dane niepublikowane.

BARTŁOMIEJ RACHWAŁ\*

## SYSTEM DETEKCJI ŚWIATŁA Z UŻYCIEM FOTOPOWIELACZY KRZEMOWYCH

---

## SYSTEM OF LIGHT DETECTION USING SILICON FOTOMULTIPLIERS

### Streszczenie

Współczesne systemy detekcji światła wymagają nieustannego prowadzenia prac badawczo-rozwojowych w celu uzyskiwania coraz lepszej efektywności zbieranego sygnału. Na bazie wyników uzyskanych podczas prac badawczo-rozwojowych detektora IFR spektrometru SuperB, prowadzonych w Ferrarze, w artykule przedstawiono wyniki optymalizacji układu zawierającego fotopowielacze krzemowe w systemie detekcji światła.

*Słowa kluczowe: fotopowielacze krzemowe, detekcja światła*

### Abstract

Modern systems of light detection require continuous research and development studies in order to achieve the best possible efficiency of the collected signal. Optimization of the light detection system, composed of silicon photomultipliers in the light is discussed, based on R&D works related to the construction of the IFR detector (SuperB collaboration).

*Keywords: Silicon Photomultipliers (SiPM), light detection*

---

\* Mgr inż. Bartłomiej Rachwał, Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego, Polska Akademia Nauk.

## 1. Wstęp

Światło – promieniowanie elektromagnetyczne – to jedyna rzecz którą widzimy! Tylko dzięki różnorodnym przejawom oddziaływań elektromagnetycznych możemy przeprowadzać eksperymenty, w których podejmujemy się pomiaru interesujących nas wielkości fizycznych. Przykładem może być tutaj odkrywanie świata cząstek elementarnych, których nie sposób przecież w sposób bezpośredni „zobaczyć”. Uwzględniając tę zasadę, budowane są dziś wielokomponentowe detektory oferujące niezwykle atrakcyjne możliwości badania struktury materii, stanowiąc jednocześnie ogromne wyzwanie techniczne.

Na drodze do zwiększania efektywności oraz dokładności pomiaru, ważne jest aby rozwijać techniki badawcze, w których wykrycie światła na poziomie pojedynczego fotonu jest bardzo istotne. W fizyce wysokich energii rolę uniwersalnego detektora światła pełnią liczniki scyntylacyjne, których działanie opiera się na zjawisku luminescencji (scyntytacji) atomów pewnych ośrodków (organicznych oraz nieorganicznych), wzbudzanych przez cząstki jonizujące. Luminescencję rejestruje się za pomocą fotopowielaczy. Szeroko stosowane do tego celu tuby fotopowielające (photomultipliers, PMT) mają wiele wad, do których głównie należy czułość na pole magnetyczne, wysokie napięcia pracy czy brak możliwości miniaturyzacji aparatury. Dlatego uwaga inżynierów oraz fizyków projektujących wielokomponentowe i bardzo złożone detektory skierowana jest obecnie na dobrze już rozwiniętą strukturę fotodetektorów zwanych fotopowielaczami krzemowymi (SiPM), których zastosowanie przy badaniu struktury świata cząstek elementarnych przedstawiono w niniejszym artykule.

## 2. Eksperymentowanie z cząstkami elementarnymi a fotodetektory światła

Kiedy w 1932 roku James Chadwick odkrył w jądrze atomu neutron, wydawało się, że to koniec odkryć na tym polu. Tymczasem od tamtej chwili naukowcy przeprowadzający doświadczenia w akceleratorach stwierdzili występowanie setek innych cząsteczek wchodzących w skład atomu. Odkryciu każdej z nich towarzyszyło pojawienie się kolejnych pytań, wymagających dalszych odpowiedzi. Badania nad strukturą otaczającego nas świata trwają i stanowią jedną z najważniejszych stref aktywności naukowej człowieka.

Cząstki elementarne jesteśmy w stanie wykryć jedynie poprzez ich różnorodne, elektromagnetyczne oddziaływania z materią. Cząstki te, przechodząc przez ośrodek, przekazują mu energię w procesach jonizacji lub wzbudzenia atomów ośrodka. To właśnie te zjawiska, które można obserwować za pomocą rejestracji jonów, światła scyntylacji, promieniowania Czerenkowa czy sygnałów pochodzących od par elektron–dziura w licznikach półprzewodnikowych umożliwiają pomiar położenia, czasu pojawienia się oraz rodzaj cząstek naładowanych.

Na polu doświadczeń fizyki cząstek elementarnych w licznikach scyntylacyjnych w zakresie śledzenia torów cząstek oraz w kalorymetrach cząstek naładowanych zostały zrealizowane pierwsze zastosowania fotodetektorów krzemowych (SiPM).

Planowane obecnie następne generacje eksperymentów będą potrzebować olbrzymiej liczby fotodetektorów, np. detektor Instrumented Flux Return (IFR) międzynarodowego zespołu naukowego, który podjął się zadania konstrukcji akceleratora i detektora cząstek o nazwie SuperB, będzie zawierał blisko 20 000 000 fotodetektorów [5]. W projektowaniu tego typu przedsięwzięcia niewątpliwie konieczne jest prowadzenie badań nad optymalizacją danego układu pomiarowego z użyciem SiPM, w celu osiągnięcia najlepszej konfiguracji całego systemu.



### 3. Fotopowielacze krzemowe (SiPM) – zasady pracy

W detekcji oddziaływania elektromagnetycznego główną rolę odgrywają dwa zjawiska, które opierają się na absorpcji pojedynczego fotonu przez pojedynczy elektron. Pierwszy, to proces fotoemisji elektronu ze powierzchni półprzewodnika, drugi – wzbudzenie elektronu ze pasma walencyjnego do pasma przewodzenia półprzewodnika. Obydwa procesy generują wolne ładunki, które pod wpływem przyłożonego ze zewnątrz napięcia implikują prąd płynący pod wpływem ciągłego oświetlenia. Ten „fotoprąd” jest w zasadzie liniowo zależny od natężenia oświetlenia. Liniowość ta jest utrzymana w szerokim zakresie intensywności [7].

Uwzględniając powyższe, zasada działania fotopowielaczy krzemowych jest stosunkowo prosta, oparta na zasadzie działania fotodiody lawinowej (ang. *Avalanche Photodiodes* – APD). Jeśli do APD zostanie przyłożone wysokie napięcie „bias” w kierunku zaporowym, to wygenerowane przez fotony elektrony doznają wystarczającego przyśpieszenia, aby produkować kolejne pary elektron–dziura w procesie jonizacji zderzeniowej na atomach Si. Każdy proces jonizacji wytwarza kolejną parę elektron–dziura. W procesie tym uderzający elektron traci energię równą przerwie energetycznej. Jeśli przyłożone pole elektryczne jest wystarczające, aby wywołać proces lawinowy, to wzrastają zarówno fotoprąd, jak i reakcja na światło (ale wydajność kwantowa zostaje taka sama).

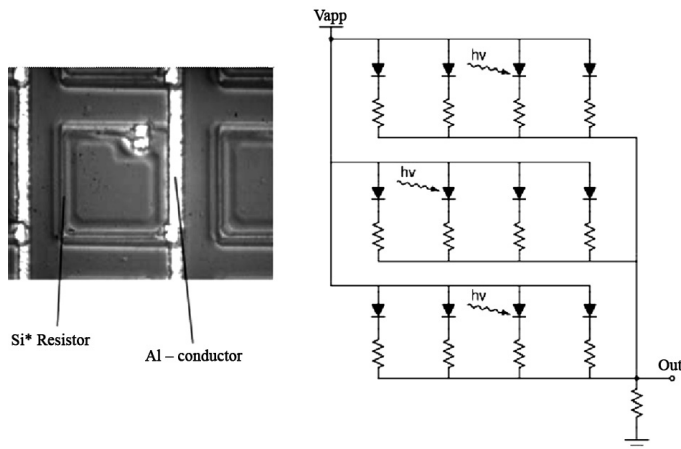
Należy pamiętać, że dla pojedynczego fotonu wartość wzbudzonego sygnału jest bardzo mała wewnątrz złącza ( $\sim 10^{-19}\text{C}$ ). Rejestracja takiego sygnału, wśród szumów wynikających ze struktury układu pomiarowego, jest ekstremalnie trudna. Aby ominąć ten problem, trzeba zapewnić wzmocnienie sygnału jeszcze wewnątrz struktury detekcyjnej (złącza n-p) przed transportem sygnału do zewnętrznego obwodu. Wartość tego wzmocnienia powinna zawierać się w przedziale  $10^4\text{--}10^6$ .

Wewnętrzne wzmocnienie w strukturze półprzewodnikowej może być uzyskane przez proces lawinowej jonizacji zderzeniowej, jak to zostało opisane powyżej. Aby proces lawinowy szybko wygasić, warstwa zubożona powinna być bardzo cienka, jak to jest tylko możliwe. Z kolei, wysoka wydajność kwantowa wymaga grubszej warstwy zubożonej. Problem ten został rozwiązany w APD przez oddzielenie regionu, w którym następuje absorpcja, od regionu wzmacniania [7].

Krzemowy fotopowielacz (SiPM) stanowi matryca zawierająca do kilku tysięcy niezależnych diod APD połączonych równolegle (rys. 1), spolaryzowanych zaporowo, pracujących nieco powyżej napięcia przebicia [2]. Ze względu na to sygnał wyjściowy jest sumą odpowiedzi od wszystkich uaktywnionych *pikseli*. W rezultacie cały obszar matrycy, w którym każdy element działa cyfrowo jako binarne urządzenie, działa jak detektor analogowy, co prowadzi do prostego a zarazem solidnego zastosowania w detektorze pojedynczych fotonów.

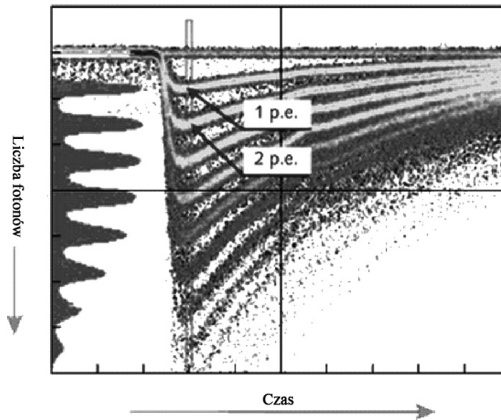
Użyteczność opisanych powyżej fotodetektorów determinuje ich kilka własności fizycznych:

- czułość odpowiedzi na światło mierzona we wzmocnieniu na jednostkę (wat) mocy światła padającego oraz jak ta czułość zmienia się wraz ze zmianą częstotliwości światła,
- prąd ciemny, który płynie nawet wówczas, gdy nie ma padającego promieniowania, co stanowi tło każdego pomiaru,
- szybkość odpowiedzi fotodetektora na zmiany oświetlenia, co determinuje szybkość przesyłu danych jaka może być osiągnięta,
- szumy pochodzące od przypadkowych fotonów oraz termicznie wzbudzonych elektronów.



Rys. 1. Powiększenie pojedynczej komórki SiPM podłączonej do polikrzemowej elektrody wygaszającej proces lawinowy [3] (z lewej); schemat zastępczy fotopowielacza krzemowego [4] (z prawej)

Fig. 1. Close-up of one cell of a SiPM that uses individual polysilicon quenching resistors [3] (left); equivalent electronic schematics of silicon photomultiplier [4] (right)



Rys. 2. Analogowy obraz sygnału uzyskanego z SiPM na oscyloskopie ukazujący rozdzielczość pojedynczych fotonów [6]

Fig. 2. Analog SiPM signal output on oscilloscope showing photon number resolution [6]

Zarówno prąd ciemny, jak i szumy nakładają ograniczenia na użyteczność fotodetektorów, gdy poziom promieniowania jest bardzo niski. Przykładane do detektora napięcie jest dostatecznie wysokie, aby generowane ładunki osiągały energie wystarczające do wytworzenia w zderzeniach z atomami kaskady elektromagnetycznej. Wynikiem tego może być pomiar impulsu elektrycznego wynikającego z absorpcji nawet jednego fotonu.

#### 4. Liczniki scyntylacyjne – wykorzystanie SiPM w badaniach podstawowych

Dla cząstki naładowanej przechodzącej przez ośrodek materialny znaczna część jej energii jest tracona w procesach powodujących wzbudzenie obojętnych atomów lub powstałych jonów dodatnich. Część tej energii (10–40%) zostaje wypromieniowana we wszystkich kierunkach w postaci fotonów. Fotony te mogą zostać zamienione na energię termiczną lub zaabsorbowane. Okazuje się, że niektóre dielektryki mają tę własność, że są przezroczyste dla pewnych długości fal fotonów emitowanych przez jony lub atomy tegoż dielektryka. Daje to możliwość wykrycia tych fotonów po wyjściu ze środka. Proces ten nazywa się zjawiskiem scyntylacji, a ośrodek mający opisaną własność – scyntylatorem. Zbierając w scyntylatorze jak najwięcej fotonów do światłowodu doprowadzonego do fotopowielacza, mamy możliwość detekcji cząstek ze względu na fakt, iż liczba tych fotonów jest proporcjonalna do energii traconej przez przelatującą cząstkę.

Światłowody wykorzystywane w układzie nowego typu detektorów scyntylacyjnych ze SiPM stanowią ważne składniki. Czułość SiPM jest największa w zakresie światła zielonego, wykorzystuje się więc włókna WLS zmieniające długość zaabsorbowanego światła (ang. *wavelength shifters*). Dodatkowo, włókna muszą mieć dobrą wydajność światła, aby zapewnić maksymalną skuteczność wykrywania.

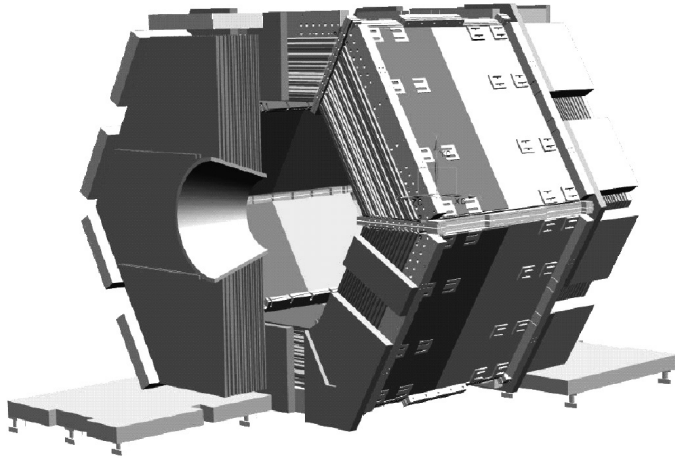
Detektory SiPM umożliwiają konwersję błysków światła zebranych przez włókna światłowodowe na sygnał elektryczny, zastępując na tym polu fotopowielacze. Daje to możliwość instalacji tego typu detektora w trudnych warunkach eksperymentu – ciasnej przestrzeni czy w wysokim polu magnetycznym. Co więcej, powinny one być w stanie pracować bezawaryjnie w czasie trwania eksperymentu ze względu na brak możliwości konserwacji. Krzemowe fotopowielacze spełniają powyższe wymagania, stanowią więc obiecujące sensory w następnych generacjach eksperymentów fizyki cząstek.

#### 5. System odczytu detektora IFR spektrometru SuperB

Projekt SuperB jest międzynarodowym przedsięwzięciem dotyczącym konstrukcji akceleratora cząstek, jak również dedykowanemu mu systemowi detekcji, prowadzonym przez Narodowy Instytut Fizyki Jądrowej we Włoszech (INFN). Detektor IFR (*Instrumented Flux Return*) stanowi jeden ze subdetektorów całego spektrometru SuperB.

Głównym celem systemu IFR ma być identyfikacja mionów oraz detekcja neutralnych hadronów. Cylindryczna budowa detektora zamknięta ze stron przez tzw. korki (Endcaps), to w głównej mierze żelazo będące absorbentem wysokoenergetycznych cząstek. Struktura ta zawiera jednak przerwy pomiędzy poszczególnymi segmentami żelaza, w których znajdują się warstwy aktywne mierzące głębokość penetracji. Warstwy aktywne, to konstrukcja zawierająca segmenty ze scyntylatorów, w których sygnały świetlne zbierane są przez światłowody (WLS fibers), na zakończeniu których znajdują się krzemowe fotopowielacze.

W celu osiągnięcia najlepszej efektywności systemu detekcji światła, jak i prostoty samego detektora obecnie trwają prace badawczo-rozwojowe grupy naukowców w Ferrarze.



Rys. 3. Struktura detektora IFR [5]

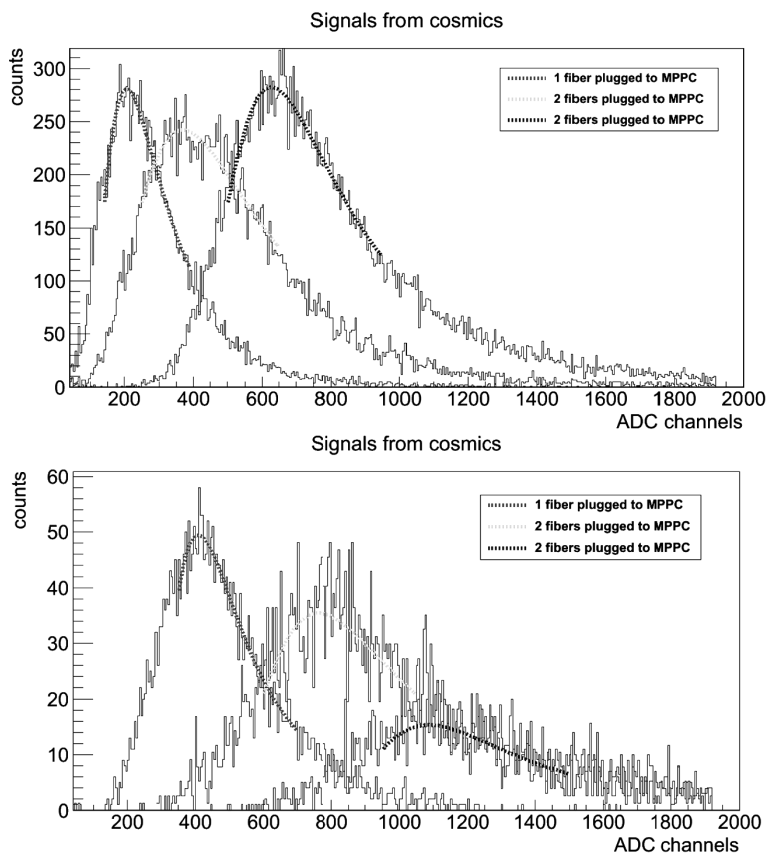
Fig. 3. The IFR flux return structure [5]

## 6. Prace badawczo-rozwojowe nad system odczytu detektora

Obecnie SiPM produkuje kilka różnych firm komercyjnych. Grupa konstruująca detektor IFR rozpoczęła prace R&D, wykorzystując urządzenia SensL, IRST-FBK oraz MPPC produkowanym przez Hamamatsu. Przy wykorzystywanej elektronice, okazuje się że urządzenia Hamamatsu gwarantują najlepszą wydajność, stanowią więc *baseline* w projektowanej konstrukcji. Ze względu jednak na ciągły rozwój tej technologii, ostateczna decyzja zależy od stanu techniki w danym czasie.

Wykorzystując pomiar promieniowania kosmicznego przy umiejscowieniu 1, 2, 3 włókien światłowodowych w scyntylatorze, sprawdzono najbardziej efektywną liczbę włókien w układzie detekcyjnym. Jak to zostało przedstawione na rys. 4, patrząc na wyniki dla 1 włókna oraz 2 włókien, przyrost wydajności wyniósł około 46%. Przy 2 oraz 3 włóknach ten przyrost wydajności pomiaru światła to 13% przy całkowitym wzmocnieniu rzędu 65% w odniesieniu do 1 włókna. Wynika stąd, iż racjonalne jest zastosowanie nie więcej niż trzech włókien w paskach scyntylatorów. Aby lepiej zrozumieć powyższe zachowanie, badania są w toku.

Wszystkie wyniki zestawiono w tabeli 1. Jak można zauważyć, różna geometria scyntylatorów ma znaczny wpływ na pomiar światła.



Rys. 4. Porównanie wydajności pomiaru światła zz 1, 2 oraz 3 włókien w systemie odczytu dla scyntylatorów o szerokości 5 cm (u góry) oraz 10 cm (u dołu). Powyższe wyniki zostały uzyskane na podstawie pomiarów promieni kosmicznych

Fig. 4. Comparison of the light yield with 1, 2 and 3 fibers readout for a 5 cm (top) scintillator strip and for a 10 cm strip (bottom). All the above plots refers to data collected with cosmic rays

Tabela 1

**Wydajność pomiaru światła w liczbie fotoelektronów dla różnych konfiguracji systemu odczytu**

|          | Wym. scyntylatora: 1 x 5 cm <sup>2</sup> | Wym. scyntylatora: 1 x 10 cm <sup>2</sup> |
|----------|--|---|
| 1 włókno | 37 ± 3                                   | 19 ± 3                                    |
| 2 włókna | 75 ± 4                                   | 37 ± 3                                    |
| 3 włókna | 105 ± 5                                  | 63 ± 4                                    |

## 7. Podsumowanie

Fotopowielacze krzemowe charakteryzuje wiele zalet. Należą do nich: wysoki współczynnik wzmocnienia ( $\sim 10^5$ ), niskie napięcie pracy ( $< 100$  V), dobra wydajność detekcji ( $\sim 30\%$ ), krótki czas odpowiedzi (*rissetime*  $< 1$  ns) oraz małe wymiary (kilka  $\text{mm}^2$ ) i niewrażliwość na pole magnetyczne. Urządzenia te nie są jednak pozbawione wad, takich jak stosunkowo wysoki współczynnik prądu ciemnego (*dark count rate*  $\sim 100$  kHz/ $\text{mm}^2$  przy 1.5 p.e.) oraz czułość na promieniowanie. Bez wątpienia jednak detektory SiPM otwierają nowe perspektywy dla dalszego rozwoju prezentowanej metody wykrywania światła w eksperymentach fizyki wysokich energii, jak również w wielu innych dziedzinach nauki. Z powyższych powodów prowadzone są, opisane w tym artykule, badania badawczo-optymalizacyjne systemu pomiarowego z SiPM, mające na celu uzyskanie jak najlepszej wydajności wykrywania światła i prostoty danego układu pomiarowego.

## Literatura

- [1] Buzhan P., Dolgoshein B., Filatov L., Ilyin A., Kaplin V., Karakash A., Klemin S., Mirzoyan R., Otte A.N., Popova E., Sosnovtsev V., Teshima M., *Large area silicon photomultipliers: Performance and applications*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 567, 2006, 78-82.
- [2] Grigoriev E., Akindinov A., Breitenmoser M., Buono S., Charbon E., Niclass C., Desforges I., Rocca R., *Silicon photomultipliers and their bio-medical applications*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 571, 2007, 130-133.
- [3] Otte N., *The Silicon Photomultiplier – A new device for High Energy Physics, Astroparticle Physics, Industrial and Medical Applications*, Max-Planck-Institut für Physik, Fohringer Ring 6, 80805 Munich, Germany.
- [4] Saveliev V., *Silicon Photomultiplier – New Era of Photon Detection*, Advances in Optical and Photonic Devices, Book edited by: Ki Young Kim, 352, January 2010.
- [5] Super B Progress reports, Detector, preprint arXiv: 1007.4241, 2010.
- [6] <http://sales.hamamatsu.com>, 11th June 2012.
- [7] Kenyon I.R., *The Light Fantastic – A Modern Introduction to Classical and Quantum Optics*.

JOANNA SKONECZNA-ŁUCZKÓW, WŁODZIMIERZ CIESIELCZYK\*

## ANALIZA EGZERGETYCZNA SUSZENIA FLUIDALNEGO

---

### EXERGY ANALYSIS OF FLUIDIZED BED DRYING PROCESS

#### Streszczenie

Prezentowano podstawy bilansowania egzergetycznego w odniesieniu do procesu suszenia fluidalnego. Zaprezentowano wyniki analizy teoretyczno-doświadczalnej suszenia ziaren maku w układzie fluidalnym pod kątem minimalizacji nakładów energetycznych.

*Słowa kluczowe: suszenie, fluidyzacja, egzergia*

#### Abstract

The work presents basics of exergy balance for fluidized bed drying process. The results of theoretical-experimental analysis of drying of poppy seeds in fluidized bed system have been shown. Results of the analysis concern minimization of energy expenditure.

*Keywords: drying, fluidized bed, exergy*

---

\* Mgr inż. Joanna Skoneczna-Łuczków, dr hab. inż. Włodzimierz Ciesielczyk, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

## Oznaczenia

- $c$  – ciepło właściwe, kJ/(kg · K)  
 $e_x$  – egzergia właściwa, kJ/kg  
 $E_x$  – egzergia, kJ  
 $m$  – masa, kg  
 $N$  – liczba fluidyzacji, –  
 $P$  – ciśnienie, Pa  
 $R$  – stała gazowa indywidualna, kJ/(kg · K)  
 $T$  – temperatura, °C  
 $t$  – czas, min  
 $X$  – zawartość wilgoci w materiale suszonym, kg wilgoci/kg suchego materiału  
 $Y$  – wilgotność bezwzględna powietrza, kg wilgoci/kg suchego powietrza  
 $\mu$  – wskaźnik jednostkowego zużycia egzergii, kJ/kg wilgoci

## Indeksy dolne

- $p$  – dotyczy powietrza  
 $v$  – dotyczy pary  
 $w$  – dotyczy wilgoci  
 $0$  – dotyczy stanu odniesienia (stanu otoczenia)  
 $1$  – dotyczy wielkości doprowadzonej  
 $2$  – dotyczy wielkości wyprowadzonej

## 1. Wstęp

Proces suszenia występuje w większości branż produkcji przemysłowej i ma decydujący wpływ na jakość otrzymywanych produktów. Suszenie w układach fluidalnych zajmuje ważną pozycję wśród nowoczesnych metod suszarniczych. Jest to metoda łatwa w realizacji, cechująca się korzystnymi wskaźnikami techniczno-ekonomicznymi [1–3]. Suszenie wymaga wysokich nakładów energetycznych, co przy stosunkowo niskiej sprawności cieplnej suszarek stosowanych w praktyce przemysłowej [4] wymusza działania innowacyjne w kierunku zwiększenia tego wskaźnika.

Analiza egzergetyczna jest istotnym narzędziem wspomagającym udoskonalanie procesu suszenia. Energia używana do suszenia materiałów jest istotną składową kosztów procesowych. Na podstawie analizy egzergetycznej można uzyskać informacje o możliwościach zwiększenia efektywności procesu suszenia i w rezultacie zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych.

Problematyka dotycząca zastosowania analizy egzergetycznej w procesie suszenia jest przedmiotem wielu publikacji. Dincer i Sahin [5] prezentują nowy model analizy egzergii w procesach suszenia. Analizę zmiany egzergii w procesie suszenia pomidora przedstawiają Kavak-Akpınar, Midilli, Bicer [6]. Ceylan [7] zajmuje się suszeniem owoców kiwi, avocado i banana z użyciem pompy ciepła pod kątem bilansowania egzergii. Aghbashlo, Kianmehr, Arabhosseini [8] przedstawiają analizę suszenia cienkich plasterków pomidora w pół-przemysłowej suszarce taśmowej. Syahrul, Hamdullahpur i Dincer [4–9] przeprowadzili analizę egzergetyczną dotyczącą suszenia zboża w złożu fluidalnym, zaś Nazghelichi, Kianmehr, Aghbashlo [10] przedstawili wyniki analizy egzergetycznej w oparciu o suszenie kostek marchwi w złożu fluidalnym.



Analiza egzergetyczna oparta na I i II zasadzie termodynamiki pozwala wskazać te etapy, gdzie energia jest degradowana podczas przebiegu procesu, co umożliwia jego usprawnienie i identyfikację przyczyn oraz obliczenia strat energii. Wykorzystanie tej metody pozwala na stosunkowo dokładne określenie tych węzłów instalacji suszarniczej, w których istnieje możliwość poprawy wskaźników techniczno-ekonomicznych. Zastosowanie egzergii do analizy procesu suszenia fluidalnego jest przedmiotem niniejszego opracowania.

Zaproponowana tematyka pracy wpisuje się na listę priorytetowych zadań suszarnictwa przedstawianą na specjalistycznych konferencjach naukowych i rekomendowanych do rozwiązania przez Komitety: Inżynierii Chemicznej i Procesowej oraz Termodynamiki i Spalania Polskiej Akademii Nauk oraz ściśle koreluje z obowiązującymi dyrektywami Unii Europejskiej.

## 2. Podstawy analizy egzergetycznej

Tworząc bilans energetyczny nie uwzględnia się niejednakowej jakości różnych postaci i różnych sposobów przekazywania energii. Dlatego oparta na tym bilansie sprawność termiczna pozwala jedynie na porównanie procesów tego samego typu, nie może być natomiast uważana za miarę stopnia doskonałości danego procesu. Inaczej jest w przypadku sprawności egzergetycznej. Przy jej obliczaniu bierze się pod uwagę fakt, że różne postacie i sposoby przekazywania energii mają niejednakową jakość. Sprawność egzergetyczna określa stopień oddalenia procesu rzeczywistego od procesu idealnego przebiegającego odwracalnie. Bilans egzergetyczny pozwala wykryć i przeanalizować wszystkie straty energetyczne występujące w całej instalacji, w tym również straty wynikające z nieodwracalności procesów, czego nie można zrealizować, stosując klasyczny bilans energetyczny. W tabeli 1 porównano właściwości egzergii i energii.

Straty egzergii wynikające z nieodwracalności procesów zachodzących wewnątrz układu nazywamy wewnętrznymi. Natomiast o zewnętrznych stratach egzergii można mówić wtedy, gdy z układu do otoczenia odpływa czynnik odpadowy (np. spaliny) o parametrach stanu różniących się od parametrów składników otoczenia. Do najważniejszych przyczyn powodujących straty egzergii należą:

- nieodwracalny przepływ ciepła,
- nieodwracalna dyfuzja składników roztworu ciekłego lub gazowego,
- spadek ciśnienia płynu podczas przepływu, spowodowany lepkością (dławienie),
- tarcie mechaniczne,
- mieszanie substancji o różnym składzie chemicznym.

Porównanie właściwości energii i egzergii [9]

| Energia   | Egzergia  |
|---|---|
| Podlega prawu zachowania  | Nie podlega prawu zachowania  |
| Funkcja stanu rozpatrywanej materii   | Funkcja stanu rozpatrywanej materii oraz funkcja stanu materii w otoczeniu  |
| Może być obliczona od umownego stanu odniesienia  | Stan odniesienia jest narzucony przez parametry otoczenia   |
| Wzrasta wraz z podwyższeniem temperatury  | Dla temperatury wyższej od temperatury otoczenia wzrasta ze wzrostem temperatury, dla temperatury niższej od temperatury otoczenia maleje ze wzrostem temperatury. Osiąga minimum dla temperatury równej temperaturze otoczenia |
| W przypadku gazów doskonałych nie zależy od ciśnienia, a w przypadku gazów rzeczywistych w niewielkim stopniu zależy od ciśnienia | Silnie zależy od ciśnienia. Wzrasta ze wzrostem ciśnienia powyżej ciśnienia otoczenia oraz z obniżeniem ciśnienia poniżej ciśnienia otoczenia. Osiąga minimum przy ciśnieniu równym ciśnieniu otoczenia                         |
| Nie zależy od względnego stężenia danej substancji w otoczeniu  | Zależy od względnego stężenia danej substancji w otoczeniu  |
| Jest taka sama lub prawie taka sama dla jednorodnych substancji, jak i ich mieszanin  | Jest zawsze mniejsza w przypadku mieszanin  |

### 2.1. Egzergia powietrza w procesie suszenia

Egzergia powietrza wilgotnego jest funkcją 6 zmiennych niezależnych [11]: temperatury, wilgotności, i ciśnienia powietrza rozpatrywanego oraz: temperatury, wilgotności i ciśnienia powietrza w otoczeniu. Egzergia właściwa powietrza wilgotnego dana jest zależnością [12–14]:

$$\begin{aligned} ex_p = & \left( c_p + Yc_v \right) \left( T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) + (1 + 1,6078Y) R_p T_0 \ln \frac{P}{P_0} + \\ & R_p T_0 \left[ (1 + 1,6078Y) \ln \frac{1 + 1,6078Y_0}{1 + 1,6078Y} + 1,6078Y \ln \frac{Y}{Y_0} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

Jeżeli powietrze służące do suszenia wpływające do kolumny suszarniczej różni się od powietrza w otoczeniu tylko temperaturą, wzór na egzergię właściwą powietrza wlotowego (1) redukuje się do egzergii termicznej, czyli do postaci [7]:

$$ex_{p1} = \left( c_p + Y_1 c_v \right) \left( T_1 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0} \right) \quad (2)$$

Wzór (1) na egzergię powietrza wylotowego mającego to samo ciśnienie, co powietrze otoczenia, ale inną już wilgotność składa się z egzergii termicznej i chemicznej, przyjmując postać [7]:

$$ex_{p2} = (c_p + Y_2 c_v) \left( T_2 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_2}{T_0} \right) + R_p T_0 \left[ (1 + 1,6078 Y_2) \ln \frac{1 + 1,6078 Y_0}{1 + 1,6078 Y_2} + 1,6078 Y \ln \frac{Y_2}{Y_0} \right] \quad (3)$$

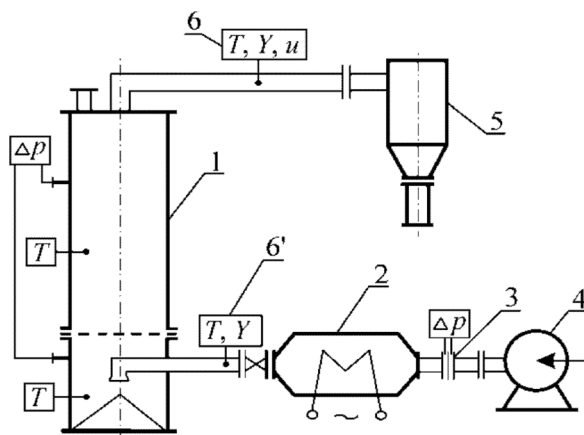
Zgodnie z propozycją Szarguta [17, 18], do oceny doskonałości procesu suszenia, może posłużyć wskaźnik jednostkowego zużycia egzergii, który definiuje się jako ilość egzergii potrzebnej do usunięcia 1 kg wody:

$$\mu_s = \frac{Ex_{p1}}{m_w} \quad (4)$$

W efekcie otrzymuje się wyrażenie, gdzie w liczniku jest egzergia właściwa powietrza suszącego, a w mianowniku różnica wilgotności bezwzględnej powietrza na wlocie i wylocie do suszarki.

### 3. Badania testowe

Badania testowe prowadzi się na instalacji doświadczalnej, której schemat przedstawiono na rysunku 1.



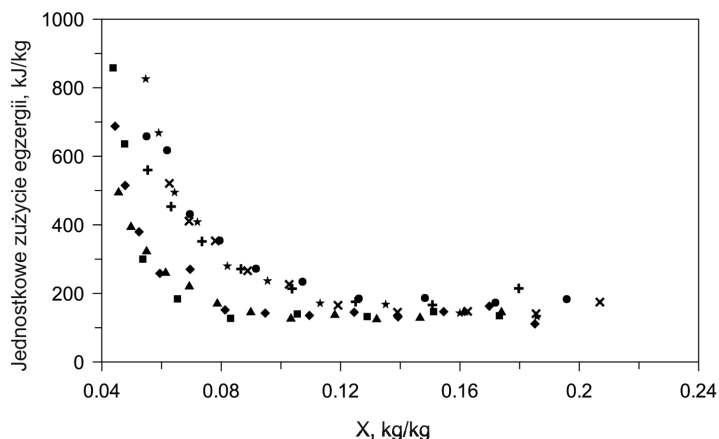
Rys. 1. Schemat stanowiska do badania suszenia fluidalnego: 1 – suszarka fluidyzacyjna, 2 – nagrzewnica elektryczna, 3 – zestaw rotametrów, 4 – wentylator, 5 – cyklon, 6, 6' – przyrządy: TESTO 452 i TESTO 112 (firmy Testo GmbH & Co.)

Fig. 1. Schema of lab bench to fluidized bed drying 1 – fluidal dryer, 2 – electric heater, 3 – a set of rotameters, 4 – air cooler, 5 – cyclonic separation, 6 – TESTO 452 and TESTO 112 devices (Made by Teston GmbH & Co.)

Oprządkowanie stanowiska badawczego zapewnia otrzymanie danych niezbędnych do charakterystyki warunków procesowych suszenia. Badania prowadzono z ziarnami maku o średnicy cząstek  $0,7 \cdot 10^{-3}$  m.

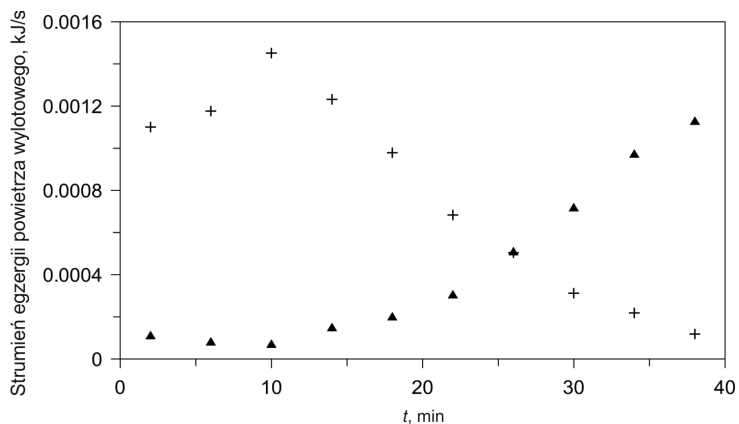
Rysunek 2 przedstawia współczynnik jednostkowego zużycia energii suszenia maku dla różnych liczb fluidyzacji. Można zauważyć, że w I okresie procesu suszenia współczynnik ten przyjmuje zbliżoną wartość dla wszystkich liczb fluidyzacji. Natomiast w II okresie procesu występuje zauważalna różnica pomiędzy wartościami analizowanego współczynnika dla suszenia w warstwie stacjonarnej i fluidalnej, przy czym dla warstwy stacjonarnej są one niższe. Spostrzeżenie to zachęca do zastosowania różnych metod realizacji procesu w I i II okresie suszenia. W okresie o stałej szybkości suszenia można zastosować intensywne warunki procesu – stosując maksymalnie dopuszczalną dla danego materiału wartość liczby fluidyzacji. Drugi okres suszenia należy realizować w złożu stacjonarnym.

Straty energii w procesie suszenia wynikają głównie z nieodwracalnego przepływu ciepła w grzejniku i komorze suszenia oraz z dodatniej wartości energii czynnika odpływającego z komory suszenia do otoczenia. Zużycie energii czynnika grzejnego można wyraźnie zmniejszyć przez zastosowanie procesu z recyrkulacją, co oczywiście związane jest z niższymi kosztami eksploatacyjnymi. Dla wyjaśnienia tego problemu w oparciu o analizę energetyczną postanowiono zbadać zachowanie się strumienia energii powietrza wylotowego w trakcie trwania procesu suszenia (rys. 3). Należy zauważyć, że energia powietrza wylotowego składa się z energii termicznej i chemicznej [6, 10]. W początkowym etapie suszenia powietrze wylotowe ma dużą energię chemiczną (rys. 3). W tym czasie powietrze, którego znaczącą część energii stanowi energia chemiczna nie powinno być zawracane do procesu, ponieważ pomimo znacznej energii nie posiada zbyt dużego potencjału niezbędnego do realizacji procesu suszenia. Dopiero po pewnym czasie trwania procesu udział energii termicznej przewyższa udział energii chemicznej, co jest pokazane na rys. 3 dla liczby fluidyzacji 1,2. Powietrze, którego energia termiczna znacznie przewyższa energię chemiczną może być użyte ponownie do procesu suszenia.



Rys. 2. Jednostkowe zużycie energii suszenia maku w funkcji wilgotności ( $\square$   $N = 0,48$ ;  $\boxtimes$   $N = 0,77$ ;  $\boxminus$   $N = 0,97$ ;  $\oplus$   $N = 1,1$ ;  $\uplus$   $N = 1,2$ ;  $\boxplus$   $N = 1,4$ ;  $\boxless$   $N = 1,5$ )

Fig. 2. Specific energy consumption of poppy drying as a function of humidity ( $\square$   $N = 0,48$ ;  $\boxtimes$   $N = 0,77$ ;  $\boxminus$   $N = 0,97$ ;  $\oplus$   $N = 1,1$ ;  $\uplus$   $N = 1,2$ ;  $\boxplus$   $N = 1,4$ ;  $\boxless$   $N = 1,5$ )



Rys. 3. Strumień egzergii termicznej i chemicznej powietrza wylotowego dla liczby fluidyzacji 1, 2  
(▲ – egzergia termiczna, + – egzergia chemiczna)

Fig. 3. Flow of thermal and chemical exergy of outlet air for fluidization numbers 1, 2  
(▲ – thermal exergy, + – chemical exergy)

#### 4. Podsumowanie

1. Celem współczesnego suszarnictwa jest zminimalizowanie zużycia energii przy maksymalnym usunięciu wilgoci do oczekiwanej wartości. Egzergia może być skutecznym narzędziem obrazującym zużycie energii przy praktycznej realizacji procesu fluidalnego suszenia. Wielkość ta będąca miarą użyteczności energii w sposób efektywny pozwala określić źródła strat energii i po ich eliminacji zredukować cenę wyrobu.
2. Analiza zmian wartości współczynnika jednostkowego zużycia egzergii sugeruje, że zastosowanie w I okresie procesu suszenia fluidyzacyjnego jak najwyższej możliwej prędkości jest ekonomicznie uzasadnione, zaś przy potrzebie suszenia poniżej wilgotności krytycznej (II okres suszenia) wskazane jest tradycyjne suszenie konwekcyjne ze złożem stacjonarnym.
3. Przez rozdzielenie egzergii powietrza wylotowego na egzergię chemiczną i termiczną można określić warunki stosowania recyrkulacji.

*Praca jest finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010–2013 jako projekt badawczy nr N N209 105739.*

## Literatura

- [1] Nazghelichi T., Kianmehr M.H., Aghbashlo M., *Energy*, 35, 2010, 4679.
- [2] Srinivasakannan C., Balasubramanian N., *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 19, 2002, 293.
- [3] Ng W.K., Tan R.B.H., *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 84, 2006, 656.
- [4] Witrowa-Rajchert D. (<http://www.agengpol.pl/LinkClick.aspx?fileticket=wq81Lx050Uc%3D&tabid=144>, dostęp z dnia 10.07.2012).
- [5] Strumiłło C., *Drying Technology*, 24, 2006, 1959.
- [6] Qureshi B.A., Zubair S.M., *International Journal of Energy Research*, 27, 2003, 1079.
- [7] Ren C.Q., Tang G.F., Li N.P., Zhang G.F., Yang J., *International Journal on Architectural Science*, 2, 2001, 113.
- [8] Cay A., Tarakcioglu I., Hepbasli A., *International Journal of Energy Research*, 31, 2007, 1251.
- [9] Szargut J., Petela R., *Egergia*, WNT, Warszawa 1965.
- [10] Ceylan I., *Engineering*, 1, 2009, 188.
- [11] Bes T., *Energetyka Przemysłowa*, 10, 1962, 388.
- [12] Dincer I., Sahin A.Z., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 2004, 645.
- [13] Ozgener L., Ozgener O., *International Journal of Energy Research*, 30, 2006, 1323.
- [14] Coskun C., Bayraktar M., Oktay Z., Dincer I., *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 4, 2009, 224.
- [15] Erbay Z., Icier F., *Drying Technology*, 27, 2009, 4.
- [16] D. Scott, *International Journal of Hydrogen Energy* 28, 2003, 368.
- [17] Gwadera M., Ciesielczyk W., *Czasopismo Techniczne*, 107, 2010, 83.
- [18] Skoneczna J., Ciesielczyk W., Mat. IV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej „Nauka i Przemysł”, Kraków, 27 listopada 2009, 168.

KATARZYNA STAŃKO\*

## PRZEGLĄD I CHARAKTERYSTYKA SYSTEMÓW PARKINGOWYCH

---

## OVERVIEW AND SUMMARY OF PARKING SYSTEMS

### Streszczenie

W artykule został zaproponowany podział systemów parkingowych. Opisano różne typy parkingów, a charakterystykę każdego z nich przedstawiono na rzeczywistych przykładach.

*Słowa kluczowe: systemy parkingowe, parking*

### Abstract

In this paper parking system division has been proposed. Different types of parking lots have been fully described and each of them was presented with an illustrated example.

*Keywords: parking systems, parking*

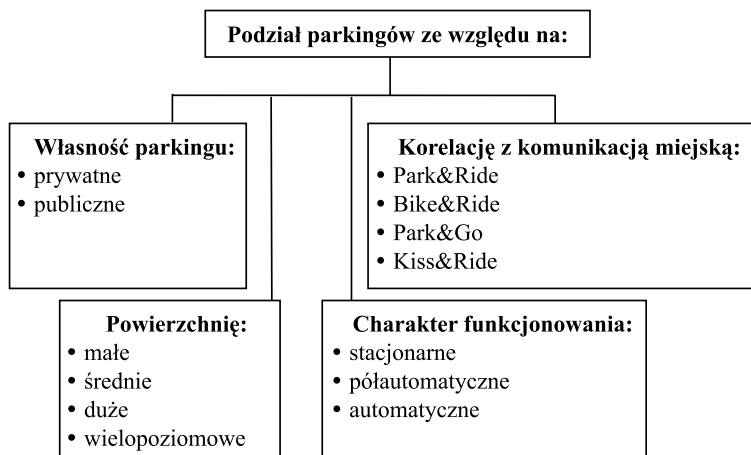
---

\* Mgr inż. Katarzyna Stańko, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska.

## 1. Wstęp

Parking jest to wyznaczone miejsce przy drodze, które służy do odstawiania środków transportu na czas określony [1]. Problemy z parkowaniem samochodów są często trudniejsze do rozwiązania niż problemy ruchu. Spowodowane jest to rozwojem motoryzacji indywidualnej [3]. Obecnie, dla praktycznie każdego kierowcy poruszającym się po coraz bardziej zatłoczonych ulicach miast, poważnym problemem jest zaparkowanie swojego pojazdu. Ciągły deficyt miejsc postojowych powoduje duże zainteresowanie wolnymi stanowiskami do parkowania wśród osób zmotoryzowanych [2].

Ze względu na wielorodajowość parkingów poniżej przedstawiono podział według wybranych kryteriów systemów parkingowych, a tym samym samych parkingów. Dzięki temu w bardzo łatwy sposób można sklasyfikować dany parking. Zaproponowany podział został zaprezentowany na rysunku 1.



Rys. 1. Podział systemów parkingowych

Fig. 1. Division of parking systems

## 2. Własność parkingu

Parking może zbudować i administrować nim osoba prywatna albo odpowiednia miejska jednostka administracyjna. W pierwszym przypadku tego typu parkingi powstają najczęściej przy siedzibach firm, sklepów, hoteli itp., a miejsca postojowe przeznaczone są dla pracowników oraz przyjeżdżających klientów. Parking o charakterze prywatnym może być też źródłem zarobku dla osoby prywatnej, jeśli posiada ona grunt w odpowiednim otoczeniu (centrum miasta, skupisko bloków lub kamienic itp.) i może wydzielić odpowiednią liczbę miejsc parkingowych [2].

Miejskie parkingi charakteryzują się tym, że na miejscach postojowych może parkować każda osoba, czyli zarówno klienci, jak i mieszkańcy pobliskiego parkingu [2]. W dużych



miastach najczęściej parkingi miejskie są płatne i zgrupowane z tego względu w Strefy Płatnego Parkowania.

Przykładem prywatnego parkingu może być parking podziemny pod Centrum Wykładowo-Konferencyjnym Politechniki Poznańskiej, a przykładem parkingu miejskiego mogą być miejsca postojowe przy ulicy Piotrowo w Poznaniu. Pierwszy z nich przeznaczony jest tylko dla osób mających odpowiednią kartę parkingową – najczęściej są to pracownicy Politechniki Poznańskiej. Drugi parking natomiast przeznaczony jest dla wszystkich użytkowników drogi, ale najczęściej z miejsc postojowych korzystają studenci odbywający zajęcia na uczelni [5]. Zdjęcia parkingów zostały zaprezentowane na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Miejski parking przy ulicy Piotrowo w Poznaniu [5]

Fig. 2. Municipal parking in the Piotrowo Street in Poznań [5]



Rys. 3. Prywatny podziemny parking znajdujący się pod Centrum Wykładowo-Konferencyjnym Politechniki Poznańskiej [5]

Fig. 3. Private underground parking below the Lecture and Conference Center of Poznań University of Technology [5]

### 3. Parkingi i ich korelacja z komunikacją miejską

Parkowanie w centrach dużych miast jest problemem od wielu lat. Aby zredukować liczbę osób, które przyjeżdżają do aglomeracji miejskich i parkują w ich centrum, stworzono system parkowania Park&Ride [5]. Jest on specjalnie oznaczony, jak na rys. 4.



Rys. 4. Przykładowe oznakowanie systemu parkowania Park&Ride [8]

Fig. 4. Example of Park&Ride parking sign [8]

W systemie Park&Ride parking usytuowany jest najczęściej na obrzeżu miasta, przy którym znajduje się bardzo dobre połączenie komunikacyjne (np. autobusowe, tramwajowe, trolejbusowe) z centrum. Osoby korzystające z tego typu systemu płacą wtedy albo za samo parkowanie samochodu i poruszają się bezpłatnie komunikacją miejską danego miasta, albo płacą za korzystanie z tej komunikacji, nie ponosząc opłat za wykorzystanie miejsca postojowego na parkingu [6]. System ten zaczął być stosowany najpierw w krajach Europy Zachodniej. W Polsce Park&Ride jest stosowany m.in. w Warszawie. Parkowanie w stolicy jest darmowe dla osób, które przesiadają się z samochodu do komunikacji miejskiej, a korzystający z parkingu jest zobowiązany do nabycia minimum dobowego biletu. Obecnie istnieje ponad dziesięć tego typu parkingów na terenie Warszawy, a kilka kolejnych jest w budowie [7]. Przykładowy parking w systemie Park&Ride w Warszawie pokazano na rys. 5.

Stosowane są też systemy Bike&Ride lub Park&Go, które są bardzo podobne w funkcjonowaniu do systemu Park&Ride. Pierwszy z nich obejmuje zaparkowanie roweru i przesiadkę do komunikacji miejskiej, a w drugim systemie parkujemy samochód na parkingu i dochodzimy pieszo do wybranego przez nas celu podróży [6].

W krajach Europy Zachodniej jest też popularny system Kiss&Ride. Stosowany jest w przypadkach, gdy kierowca podwozi pasażera na przystanek skorelowany z komunikacją miejską. W tym przypadku pojazd zatrzymuje się na takim parkingu przez najwyżej kilka minut, aby poczekać na wyjście pasażera z samochodu albo na jego przybycie z przystanku [6]. Parkingi są specjalnie oznakowane, jak na rys. 6.

a)



b)



c)



Rys. 5. Parking Park&Ride w Warszawie „Metro Młociny” [7]; a) widok parkingu na zewnątrz, b) mapa z dojazdem do parkingu, c) widok wnętrza parkingu

Fig. 5. Parking Park&Ride in Warsaw „Metro Młociny” [7]; a) exterior view of the parking lot, b) map of the approach road to the parking, c) interior view of the parking lot



Rys. 6. Oznakowanie parkingu Kiss&Ride [9]

Fig. 6. Kiss&Ride parking sign [9]

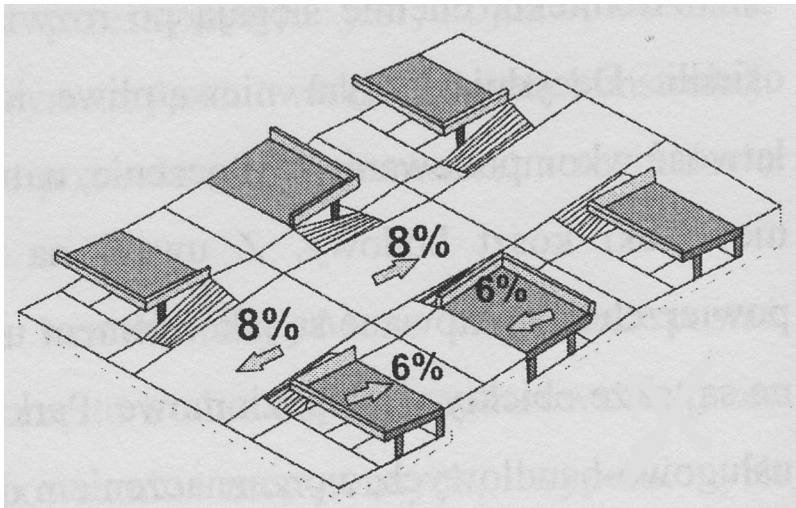
#### 4. Podział parkingu ze względu na powierzchnię

Jednym z najprostszych sposobów podzielenia parkingów jest ich podział ze względu na powierzchnię jaką zajmują, co może wyrażać się przez liczbę miejsc postojowych znajdujących się na danym parkingu. Wyróżniamy [4]:

- mały parking – do czterech miejsc postojowych,
- średni parking – od pięciu do sześćdziesięciu miejsc postojowych,
- duży parking – ponad sześćdziesiąt miejsc postojowych.

W aglomeracjach miejskich popularne są parkingi wielopoziomowe, co ma na celu zwiększenie liczby miejsc postojowych na parkingach, które zajmują proporcjonalnie małą powierzchnię w zabudowie miasta. Najczęściej powstają one przy centrach handlowych albo dużych biurowcach, ale istnieją też wolno stojące budynki-parkingi. Wśród parkingów wielopoziomowych wyróżnia się [2]:

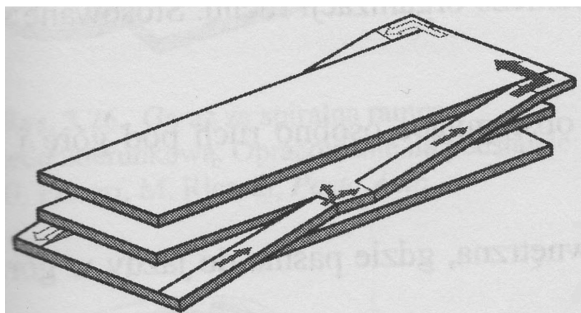
1. System Park-a-Back – jest to parking dwupoziomowy, którego budowa polega na spiętrzeniu wyłącznie miejsc postojowych. Oba poziomy są udostępnione z przeciwnych stron na skutek odpowiedniego ukształtowanego dojazdu. Dzięki temu powstają częściowo nakładające się trakty, które zostały wytyczone na przemian: na powierzchni terenu i na płytach [2] (rys. 7).



Rys. 7. Przykładowe rozwiązanie parkingu w systemie Park-a-Back [2]

Fig. 7. Solution example of the Park-and-Back system parking [2]

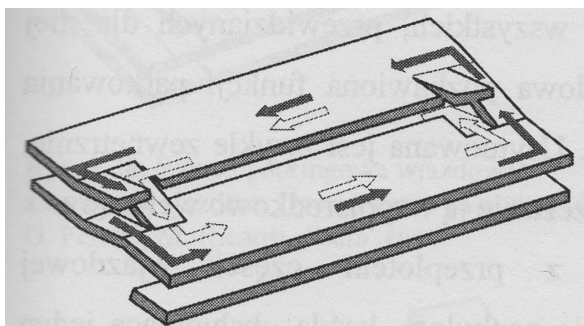
2. Parkingi płytowe proste z rampą – są to obiekty, których zaletą jest układ przestrzenny oparty na płaskich równoległych stropach mieszczących miejsca postojowe. Dostęp do nich zapewnia rampa, a kierowca korzystający z niej musi pokonać wysokość pełnej kondygnacji w celu osiągnięcia kolejnego poziomu parkowania. Kształt i umiejscowienie pochylni decyduje o różnorodności rozwiązań – może być ona prostoliniowa lub spiralna (rys. 8).



Rys. 8. Przykładowe rozwiązanie parkingu płytowego prostoliniowego prostego z rampą [2]

Fig. 8. Simple straight plate parking ramp solution example [2]

3. Parkingi podestowe – tego typu obiekty są szczególnie przydatne, jeśli ukształtowanie terenu wymaga zmiany poziomu części budynku o wysokość połowy kondygnacji. Operacja parkowania odbywa się na płaskich płytach, które przesunięte są względem siebie o połowę wysokości kondygnacji, a poszczególne poziomy parkingu połączone są ze sobą równoległymi pochylniami. Zazwyczaj każda z płyt ma dwa szeregi stanowisk z uliczką przejazdową w środku [2] (rys. 9).



Rys. 9. Przykładowe rozwiązanie parkingu podestowego z ruchem jednokierunkowym i połączonym obiegiem wjazdu oraz wyjazdu [2]

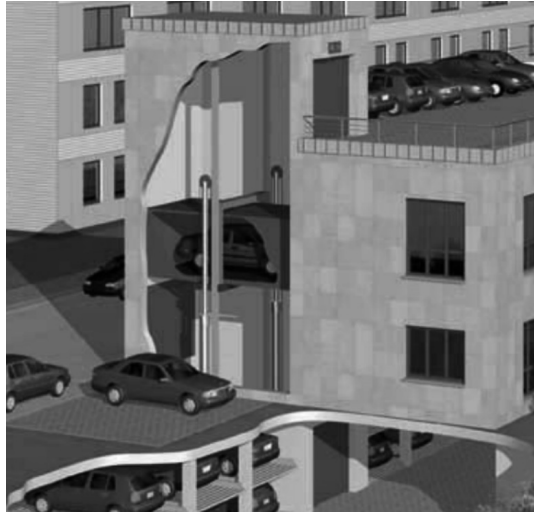
Fig. 9. One-way traffic and a combined circulation of entry and exit parking system solution [2]

## 5. Charakter funkcjonowania parkingów

Parkingi można również podzielić ze względu na charakter ich funkcjonowania – czy przy parkowaniu pojazdu jesteśmy lub nie wspomagani urządzeniami mechanicznymi, które mają tę czynność usprawnić. W ten sposób parkingi dzieli się na: stacjonarne, półautomatyczne oraz automatyczne [10]. Parkowanie na stacjonarnym parkingu odbywa się bez pomocy jakichkolwiek mechanicznych urządzeń – to kierowca decyduje, w jaki sposób zaparkuje (zgodnie z oznakowaniem parkingu), w jakim miejscu oraz w jakiej odległości od innych pojazdów [3].

Półautomatyczne parkingi są połączeniem parkingów stacjonarnych i automatycznych, ale automatyzacja ograniczona jest zaledwie do jednej lub kilku operacji. Manewrowa część wykonywana jest przy udziale kierowcy, a druga – związana z podnoszeniem i przenoszeniem pojazdów – wykonywana jest z udziałem mechanicznych urządzeń [2]. Wykorzystywane mechaniczne urządzenia to [2]:

1. Dźwigi – parkowanie z wykorzystaniem dźwigów jest zbliżone do tradycyjnych rozwiązań wielopoziomowych. Zamiast pochylni stosowane są dźwigi, które podnoszą samochód wraz z kierowcą na odpowiedni poziom. Dla kierującego pojazdem zostaje wtedy do wykonania tylko manewr podjazdu do wolnego stanowiska postojowego. Tego typu rozwiązanie jest optymalne w przypadku niewielkiej liczby miejsc parkingowych oraz dla obiektów, których przeznaczenie nie skutkuje przyjazdem wielu samochodów w tym samym czasie (centra handlowe, biurowce) [2, 11]. Przykładem parkingu z wykorzystaniem dźwigów może być system Autowinda oferowany przez firmę MA-SKI (rys. 10).

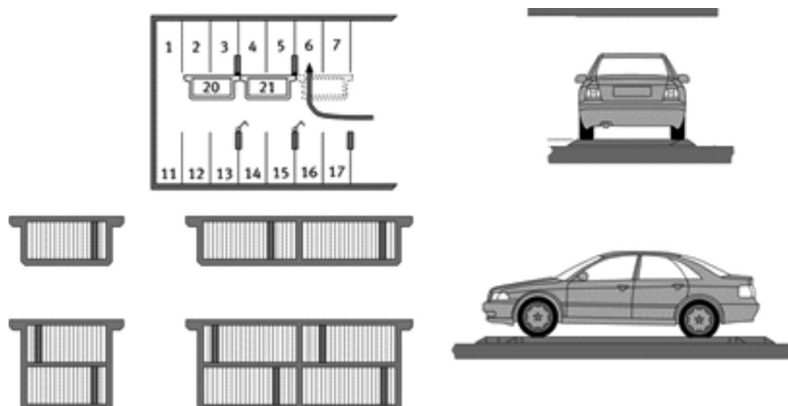


Rys. 10. System dźwigowy Autowinda realizowany przez firmę MA-SKI [11]

Fig. 10. Autowinda elevator system implemented by the MA-SKI [11]

2. Palety przesuwne – w parkingach wykorzystujących tego typu rozwiązanie, tradycyjne planowane stanowiska nie ulegają zmianie. W obrębie pasa manewrowego stosowana jest technika przesuwanych palet, które tworzą dodatkowe, mobilne miejsca postojowe. Ich funkcjonowanie polega na horyzontalnym przemieszczaniu się dzięki prowadnicom, które zamontowane są na posadzce. Stosowane są dwa rozwiązania: palety umieszczone wzdłuż drogi dojazdowej (prostopadle do tradycyjnych stanowisk postojowych) oraz palety zamontowane w kilku szeregach przed rzędem miejsc stałych. W przypadku gdy osoba parkująca samochód na zablokowanym miejscu chce odjechać, wybiera w specjalnym panelu sterowania numer swojego stanowiska. Wówczas wszystkie palety, które zagradzają dostęp do samochodu, przesuwają się z zaparkowanymi na nich pojazdami, aby umożliwić kierowcy dojście do swojego samochodu i wyjazd z parkingu [2, 12]. Przykładem może być system parkingowy Palety PE realizowany przez firmę Pateh (rys. 11).

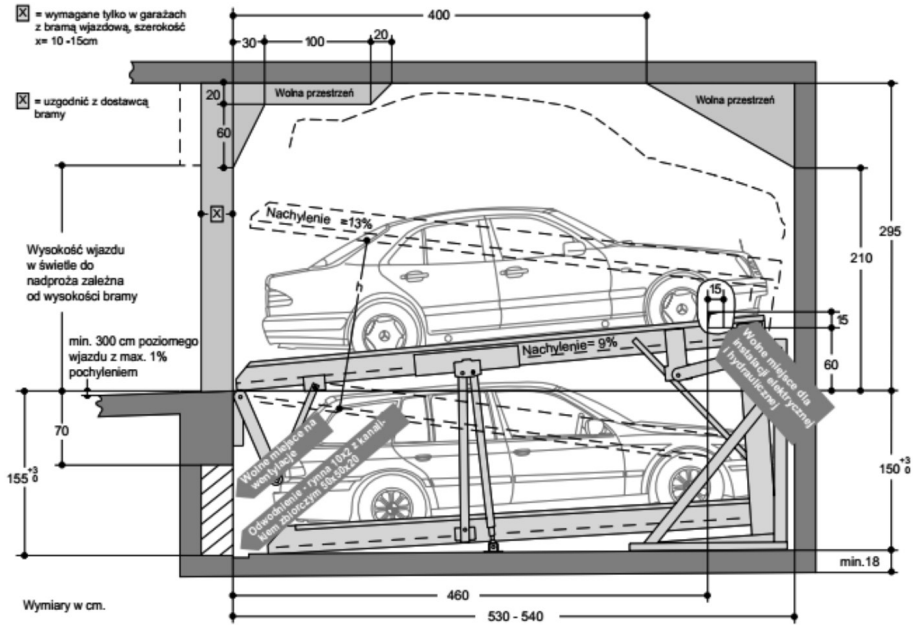




Rys. 11. System parkingowy paletowy przesuwny (Palety PE) realizowany przez firmę Patech [12]

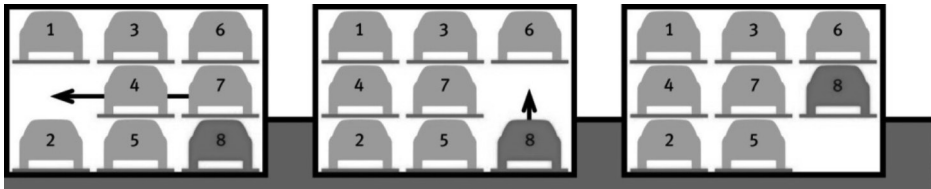
Fig. 11. Sliding parking system (PE pallets) implemented by Patech [12]

3. Podnośniki miejsc – w tym systemie dojazd do stanowisk odbywa się w sposób tradycyjny (z wykorzystaniem ramp i pasów manewrowych), a samo parkowanie pojazdu jest zmechanizowane. Pojazdy umieszczane są w pionie jeden nad drugim, a parkowanie odbywa się na pełnych, stalowych platformach. Są one ustawione poziomo lub pochyło i rozmieszczone wzdłuż drogi dojazdowej – tak jak stanowiska tradycyjne. Wykorzystując siłownik hydrauliczny, platforma z samochodem (bez kierowcy oraz pasażerów) jest podnoszona lub opuszczana, co powoduje zwolnienie miejsca postojowego dla następnego pojazdu. Parkowanie z wykorzystaniem podnośników miejsc może mieć charakter zależny lub niezależny. Pierwszy z nich charakteryzuje się tym, iż proces parkowania pojazdu odbywa się w obrębie wysokości kondygnacji – pojazd umieszczony na dole musi wyjechać, aby umożliwić dostęp do górnej platformy. W parkowaniu niezależnym konstrukcyjnie wymagane jest zagłębienie poniżej drogi dojazdowej, gdzie zostaje opuszczony samochód na niższej platformie. Dzięki czemu umożliwia on wjazd innego pojazdu na wyższy poziom [2,11]. Przykładem systemów parkowania z wykorzystaniem podnośników miejsc mogą być systemy z grupy Parklift realizowane przez firmę MA-SKI. Przykład systemu Parklift340 zaprezentowano na rys. 12.
4. Systemy podnosząco-przesuwne – jest to rozwiązanie najbardziej zaawansowane technicznie. Urządzenia wykorzystywane w systemach podnosząco-przesuwnych łączą w sobie funkcje podnoszonych platform i palet przesuwnych. Kierowca pozostawia swój pojazd na palecie, która może przemieszczać się w górę, w dół oraz na boki. Jest to możliwe dzięki wykorzystaniu napędu elektrycznego. Jednemu tradycyjnemu stanowisku do parkowania odpowiada moduł składający się z trzech stanowisk w pionie. Środkowe oraz górne miejsca postojowe skonstruowane są w obrębie kondygnacji, a dolne stanowiska parkingowe wymagają zagłębienia w terenie. W każdym bloku jest jedno wolne stanowisko postojowe na poziomie dojazdu. W sytuacji gdy kierowca chce opuścić pojazd, na wolne miejsce parkingowe przesuwana się sąsiednia paleta, która umożliwia opuszczenie płyty górnej bądź podniesienie płyty dolnej [2, 12]. Przykładem takiego rozwiązania może być TrendVario4300 realizowany przez firmę Patech. Zasadę działania tego systemu zaprezentowano na rys. 13.



Rys. 12. Podnośnik miejsc – system Parklift340 realizowany przez firmę MA-SKI [11]

Fig. 12. Jack places – Parklift340 system implemented by MA-SKI [11]



Rys. 13. Zasada działania systemu podnosząco-przesuwnego TrandVario4300 realizowany przez firmę Patch [12]

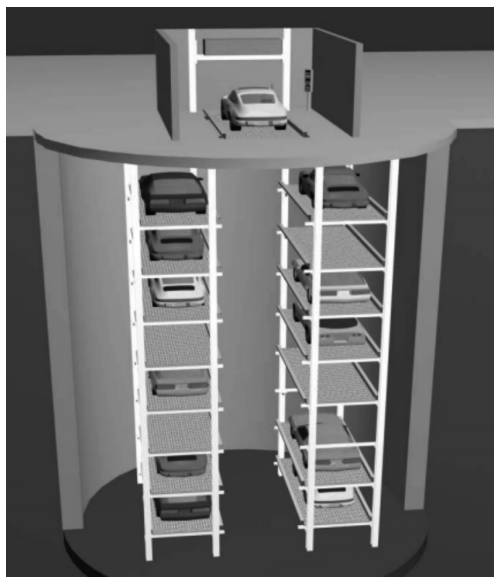
Fig. 13. The operation principle of the hoisting-shift TrandVario4300 implemented by Patch [12]

W parkingach automatycznych proces parkowania odbywa się całkowicie w sposób zmechanizowany. Kierowca wjeżdża pojazdem do terminalu i parkuje samochód na wyznaczonym miejscu. Pozycja środka transportu kontrolowana jest przez fotokomórki lub inne urządzenia monitorujące. Po odpowiednim ustawieniu samochodu kierowca opuszcza wnętrze pojazdu oraz terminal. Następnie otwierana jest przegroda oddzielająca wnętrze parkingu i następuje rozpoczęcie procesu składowania pojazdu. Każda operacja wykonywana jest pod kontrolą systemu komputerowego i bez ingerencji obsługi [2, 3, 10]. Systemy do automatycznego parkowania można podzielić na [2]:

- statyczne ze stałymi stanowiskami – charakteryzują się tym, iż w betonowej obudowie mieści się niezależna konstrukcja regałów, wzdłuż których przemieszcza się winda umożliwiająca odstawianie pojazdów na półki. Urządzenia, które używane są tutaj do transpor-



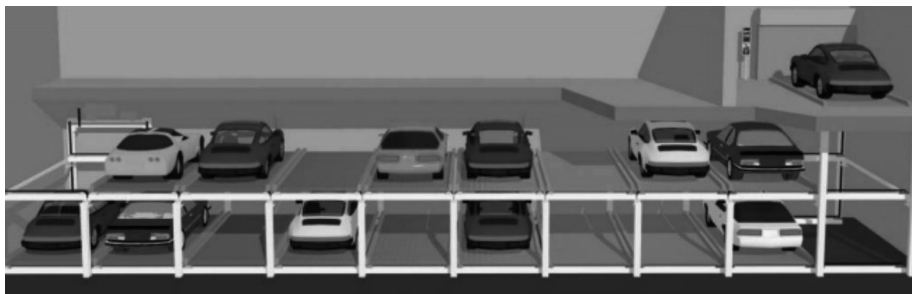
tu pionowego to dźwigi elektryczne i hydrauliczne, podnośniki widłowe lub systemy mieszane. Najczęściej wykorzystywane są dźwigi, a obiekt z takim rozwiązaniem nazywamy wyciągiem wieżowym. Każdy podnośnik obsługuje w nich ograniczoną liczbę stanowisk na każdym poziomie i udostępniane są dwa przeciwległe miejsca. W tym przypadku mechanizm składowania samochodów jest uproszczony i wykonuje dwa ruchy: podnoszenie pionowe oraz ruch wprowadzający [2, 11, 13] (rys. 14).



Rys. 14. Przykładowy wyciąg wieżowy – system Parksafe580 realizowany przez firmę MA-SKI [11]

Fig. 14. Example of the lift tower – Parksafe580 system implemented by the MA-SKI [11]

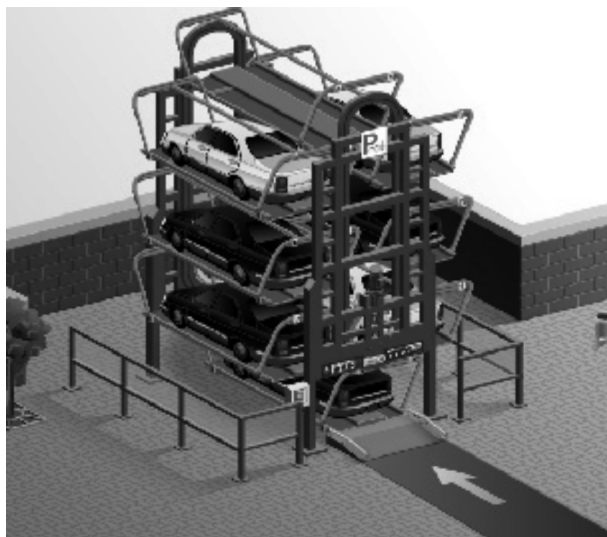
- przestawne z mobilnymi stanowiskami – tego typu systemy parkingowe są rozwinięciem półautomatycznych rozwiązań podnosząco-przesuwnych. Ich działanie polega na tym, iż pojazd opuszczający parking zostaje dostarczony na palecie na platformę dźwigu lub miejsce wyjazdu w sposób, który wymaga przemieszczenia zaparkowanych innych samochodów. W tym celu wykorzystywane jest jedno lub dwa wolne stanowiska (uzależnione jest to od wielkości parkingu). Każdorazowe opuszczenie miejsca postojowego przez pojazd nie skutkuje przemieszczeniem wszystkich zajętych palet. O tym, które z nich mają zostać przesunięte decyduje aktualne położenie opuszczającego parking pojazdu względem wolnych stanowisk i miejsca wyjazdu. W systemach przestawnych z mobilnymi stanowiskami wyróżnia się systemy horyzontalne i wertykalne [2, 11]. Przykład horyzontalnego rozwiązania przedstawiono na rys. 15.



Rys. 15. Przykładowy horyzontalny system przesuwany z mobilnym stanowiskiem Flurparker 590 realizowany przez firmę MA-SKI [11]

Fig. 15. An example of horizontal sliding system with mobile Flurparker 590 implemented by the MA-SKI [11]

- rotacyjne z mobilnymi stanowiskami – w systemach parkingowych tego rodzaju miejsca postojowe umiejscowione są w ruchu okrężnym. Każdorazowe opuszczenie parkingu przez pojazd skutkuje przemieszczeniem wszystkich stanowisk (zarówno wolnych, jak i zajętych) do momentu, aż żądany pojazd pojawi się na miejscu wyjazdu. Aby skrócić czas tego manewru, stosowany jest ruch w obie strony. W systemie rotacyjnym z mobilnymi stanowiskami pojazdy spoczywają na paletach albo postojowych boksach. Istnieje wiele różnych rozwiązań składowania typu rotacyjnego – wertykalny, horyzontalny oraz ich różnorodna mieszanina [2, 14]. Przykład rozwiązania wertykalnego zaprezentowano na rys. 16.



Rys. 16. Przykładowy wertykalny system rotacyjny realizowany przez firmę Parking System Solutions [14]

Fig. 16. Vertical rotation system implemented by Parking System Solutions [14]

## 6. Podsumowanie

Parkingi są nieodłącznym elementem dzisiejszej infrastruktury miast. Zapotrzebowanie na nie jest wynikiem wzrostu motoryzacji w ostatnich latach. Planując budowę nowych obiektów (mieszkalnych czy też użytkowych), projektanci muszą wziąć pod uwagę i zaprojektować miejsce, gdzie kierowca będzie mógł pozostawić swój pojazd. Z tego też powodu należało sklasyfikować parkingi oraz systemy parkingowe, co zostało w tym artykule przedstawione.

## Literatura

- [1] encyklopedia.pwn.pl – hasło parking, data odczytu: 15.02.2012.
- [2] Biedrońska J., Figaszewski J., Kozak K., Lisik A., Mikoś-Rytel W., *Projektowanie obiektów motoryzacyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [3] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2011.
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie
- [5] Stańko K., *Studium funkcjonowania oraz wybór nowego systemu parkingowego przy Placu Powstańców Wielkopolskich w Sierakowie Wielkopolskim*, praca magisterska, Politechnika Poznańska, Poznań 2012.
- [6] Spillar R.: *Park and Ride Planning and Design Guidelines*, Parsons Brinckerhoff Inc., New York 1997.
- [7] www.ztm.waw.pl, data odczytu: 29.03.2012.
- [8] www.amsterdam.info, data odczytu: 17.04.2012.
- [9] www.rynekkolejowy.pl, data odczytu: 17.04.2012.
- [10] Dumnicki J., Kreczmer J, Remisz L., *Parkingi w miastach*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1979.
- [11] www.maski.com.pl, data odczytu: 22.04.2012.
- [12] www.pateh.com.pl data odczytu: 24.04.2012.
- [13] Dumnicki J., Laskus E., *Budownictwo zaplecza samochodowego*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1970.
- [14] www.parkingsystemsolutions.com, data odczytu: 30.04.2012.



MARTYNA STASINIEWSKA\*

## ARCHITEKTURA DLA WSZYSTKICH A EKONOMIA PRZESTRZENI

---

### ARCHITECTURE FOR EVERYONE VS EKONOMICAL SPACE

#### Streszczenie

Artykuł jest przedstawieniem myśli projektowania uniwersalnego popartego rozmowami z osobami niepełnosprawnymi podczas warsztatów organizowanych na Politechnice Wrocławskiej „Architektura dla Wszystkich”<sup>1</sup> oraz wynikiem badań „Archi-sprawni<sup>2</sup> przeprowadzonych we Wrocławiu, Dobroszycach i Sycowie w ośrodkach terapii zajęciowej. Celem artykułu jest pokazanie, że projektowanie uniwersalne nie jest projektowaniem specjalnym, wobec czego nie może być traktowane jako dodatek do projektu wyjściowego bądź ekskluzywna, kosztowna forma. Ma uzmysłwić architektom i wszystkim użytkownikom przestrzeni, że uniwersalny design jest dla każdego, a w języku architektonicznym pojęcie niepełnosprawności nie istnieje.

*Słowa kluczowe: niepełnosprawność, uniwersalizm, intelekt, bezpieczeństwo*

#### Abstract

This paper is the presentation of the ideas of universal design, supported by interviews with people with disabilities at a workshop „Architecture for All” organized at the Wrocław University of Technology and the result of research „Archi-able. Architectural design including people with intellectual disabilities” carried out in Wrocław, Syców Dobroszyce and occupational therapy centers. The purpose of this article is to show that universal design is not a special design, so that it should not be seen as an addition to the final project, or some exclusive, expensive form. It should make the architects and all the users realize, that universal design is for everyone, and that from the architectural point of view there is no such thing as disability.

*Keywords: disability, universalism, intellect, safety*

---

\* Mgr inż. arch. Martyna Stasiniewska, Zakład Kształtowania Środowiska, Wydział Architektury, Politechnika Wrocławska.

<sup>1</sup> Organizator: Koło Naukowe Humanizacja Środowiska Miejskiego, Wydział Architektury PWr. Główny koordynator: Martyna Stasiniewska.

<sup>2</sup> Pomysłodawca mgr Magdalena Zobek, studenci biorący udział: J. Czernicka, K. Bocian, J. Rybka, A. Omiotek, J. Łątka, M. Stasiniewska.

## 1. Wstęp

### 1.1. Człowiek i architektura

Architektura jest dla człowieka. Nigdy odwrotnie. Człowiek jest twórcą, ale i odbiorcą architektury, która towarzyszy mu przy wykonywaniu czynności życiowych, od snu, przez przygotowanie i spożywanie posiłków, relaks, pracę, zabawę, aż po budowanie relacji międzyludzkich. Architektura ma za zadanie zapewnić zarówno podstawowe potrzeby człowieka, jak i te wyższego rzędu, a przynajmniej, umożliwić ich realizowanie. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na bardzo ważne aspekty życia ludzkiego – cielesność, duchowość i indywidualność. Fakt, że każdy jest inny – wysoki lub niski, młody lub stary, wierzący czy nie, sprawny bądź niepełnosprawny stawia przed architektem wyzwanie trudne do zrealizowania – zaprojektowanie przestrzeni uniwersalnej, miejsca dla wszystkich.

### 1.2. Pojęcie niepełnosprawności w architekturze

Jak już zostało wspomniane we wstępie: pojęcie niepełnosprawności w architekturze nie istnieje. Oczywiście są definicje medyczne i psychologiczne, klasyfikujące osoby niepełnosprawne, mówiące o stopniach i rodzajach niepełnosprawności. Problem polega na tym, że pod względem architektonicznym każdy jest niepełnosprawny i to w zależności od czasu, miejsca, a niekiedy nawet ubioru. Moja definicja, definicja architekta, jest taka, że osobą niepełnosprawną jest każdy, kto nie może w pełni skorzystać z budynku bądź formy czy przestrzeni architektonicznej. Jest nią dziecko, kobieta w ciąży, kurier niosący dużą paczkę, kobieta w szpilkach, alergik, osoba, która cierpi na lęk wysokości czy klaustrofobię, jest nią każdy człowiek, który zastanawia się, czy pójść korytarzem w lewo czy prawo. Ten ostatni przykład jest może banalny, bo problem ten jest błahy i z perspektywy czasu rozwiązuje się szybko, a z innymi przykładami jest znacznie trudniej. Takie przykłady niepełnosprawności architektonicznej uświadamiają fakt, że jeżeli architekt zaprojektuje szerszy korytarz, to nie tylko ułatwi poruszanie się osobie na wózku, ale także matce prowadzącej wózek dziecięcy lub kurierowi niosącemu paczkę czy każdemu z nas przy przeprowadzce. Dlatego pojęcie projektowania uniwersalnego jest tak ważne.

### 1.3. Analiza ludzkiego życia. Schematy, symbole i ich uniwersalizm

Według Antoniego Kępińskiego, lekarza psychiatry, naukowca i filozofa, życie ludzkie opiera się na trzech fazach: planowaniu, realizacji i sprawdzania. Pierwszą i trzecią wykonuje się w przestrzeni prywatnej, natomiast druga odbywa się w interakcji z innymi użytkownikami przestrzeni wspólnej. Faza realizacji jest ścieraniem się planów wszystkich użytkowników, którzy znajdują się w danej czasoprzestrzeni. Jest odbiorem i wysyłaniem symboli, znaków, gestów. Człowiek nie może istnieć bez społeczeństwa, bez relacji międzyludzkich i swojego celu. Każdy z nas tworzy swoje społeczności, a w nich swoje symbole. Symbol rozumiany jest nie tylko jako ikona, rysunek, ale także jako gest, słowo, zachowanie, obyczaj itp. Każda kultura, grupa ludzka ma swoje znaki, z którymi się utożsamia. Tworząc przestrzeń dla realizacji życia – spotkań, pracy, biegu, odpoczynku, jedzenia – należy pamiętać o właściwym jej odbiorze przez użytkowników.

## 2. Poszukiwanie uniwersalizmu w projektowaniu architektonicznym

### 2.1. Sposoby pracy

Sposobem pozyskania wytycznych do projektowania uniwersalnego było przeprowadzenia dwóch rodzajów warsztatów. Pierwsze, organizowane na Politechnice Wrocławskiej przez studentów z Koła Naukowego Humanizacja Środowiska Miejskiego miały na celu zrzeszenie przyszłych projektantów i pokazanie im problemu niepełnosprawności (tej „medycznej”) w architekturze przez dostosowanie budynków. Na tych warsztatach, o nazwie: „Architektura dla Wszystkich”, były obecne osoby niepełnosprawne ruchowo, niewidome, niedowidzące, które opowiadały o barierach architektonicznych, które najbardziej doskwierają w ich życiu codziennym. Po uzyskaniu odpowiedzi na szereg pytań dotyczących podstawowych funkcji życiowych oraz próbę przejechania na wózku inwalidzkim przez wrocławski rynek, studenci zaprojektowali nowe budynki lub dostosowali istniejące do potrzeb niepełnosprawnych.

Drugim rodzajem warsztatów – „Archisprawni. Projektowanie architektoniczne z uwzględnieniem osób niepełnosprawnych intelektualnie”, było przeprowadzenie dyskusji, projektu, zrobienie rysunku przez osoby niepełnosprawne intelektualnie. Studenci z wyżej wspomnianego koła naukowego pod opieką psycholog Magdaleny Zobek poprowadzili warsztaty dla osób dorosłych z umiarkowaną niepełnosprawnością intelektualną w trzech miejscowościach: Wrocławiu, Dobroszycach i Sycowie.

### 2.2. Metody pracy

W przeprowadzonych warsztatach „Archisprawni. Projektowanie architektoniczne z uwzględnieniem osób niepełnosprawnych intelektualnie” zastosowano następujące metody prowadzenia zajęć:

- Warsztat 1 – Mój wymarzony dom. Metoda: dyskusja;
- Warsztat 2 – Kształt przyjemny i nieprzyjemny. Metoda: wybór spośród dwudziestu kartek z kształtami, podział na pozytywne i negatywne, wybór trzech najbardziej pozytywnych i najbardziej negatywnych. Dyskusja;
- Warsztat 3 – Miejsca wspólne. Metoda: projekt – rysunek;
- Warsztat 4 – Ocena architektury. Metoda: prezentacja multimedialna – komentowanie wyświetlanych zdjęć.

W warsztatach wzięły udział trzy grupy 10–12 osobowe spełniające łącznie warunki: orzeczoną umiarkowaną stopień niepełnosprawności intelektualnej; brak w orzeczeniu niepełnosprawności sprzężonej; miejsce zamieszkania na terenie powiatu wrocławskiego; udział w instytucjonalnych formach terapii dziennej lub pobyt stały w instytucjach udzielających pomocy osobom niepełnosprawnym (Domy Opieki, Domy Pomocy Społecznej).












Warsztat 1 – Mój wymarzony dom








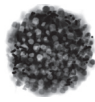

|                                 | Dobroszyce – wieś   | Syców – małe miasto   | Wrocław – duże miasto   |
|---------------------------------|---|---|---|
| <b>Rodzaj zabudowy</b>          | jednorodzinna   | jednorodzinna lub mały blok   | wielorodzinna   |
| <b>Wielkość</b>                 | małe domki  | duże pokoje   | duże przestronne pokoje   |
| <b>Okna</b>                     | małe okna   | duże okna na ogród  | duże okna   |
| <b>Ściany i podłogi</b>         | podłoga wykafelkowana, antypoślizgowa, bezpieczna   | podłoga drewniana, ściany jasne, żółte lub zielone  | drewniana podłoga   |
| <b>Zieleni</b>                  | kwiaty na balkonie  | drzewa wokół domu, dużo zieleni   | kwiaty na balkonie  |
| <b>Kolory</b>                   | jednolite kolory, jasne ściany  | kolorowe, ale jasne, najczęściej żółte  | wzorzyste, kolorowe, jasne ściany   |
| <b>Podwórko</b>                 | pies, płot, ogrodzenie, monitoring, drzwi antywłamaniowe  | własny ogród, otoczony niskim płotem  | miejsca wspólne, szklane drzwi, bez ogrodzenia  |
| <b>Najbliższe otoczenie</b>     | w okolicy szpital, posterunek policji, przystanek, małe bezpieczne ulice, kościół, małe sklepy, proste chodniki i przejścia dla pieszych przy zwęźnieniach ulic, dużo zieleni | wszystko w najbliższym otoczeniu: boiska, basen, sklepy z ciuchami, park, apteka; spokojna okolica, znajomi w sąsiedztwie | proste ulice, mogą być ruchliwe, blisko przystanki komunikacji miejskiej i biletomaty, dużo zieleni, fontanny, bar, kino, teatr, supermarket, sport, szerokie chodniki oddzielone od ścieżek rowerowych |
| <b>Meble, niezbędne sprzęty</b> | zlewozmywak, odkurzacz, piwnica, kamera, alarm, drzwi antywłamaniowe, kominek, basen  | duże łóżko, telewizor, laptop, łóżko na cały pokój, żeby z łóżka można było pracować na komputerze                        | strefowanie miejsca pracy i odpoczynku, biurko, łóżko, komputer, laptop   |

Wnioski: Osoby niepełnosprawne intelektualnie udzielają schematycznych i konkretnych odpowiedzi. W ich potrzebach przeważają przedmioty, których nie mają i o nich marzą lub które wynikają z niepełnosprawności ruchowej (podjazd, podłoga antypoślizgowa). Widać wyraźną różnicę w odpowiedziach osób z dużego miasta i wsi. Mieszkańcy Wrocławia są otwarci na ludzi, chcą się spotykać, wychodzić z domu. Mieszkańcy Dobroszyc są wyraźnie wykluczeni ze środowiska, chcą odgrodzić się wysokim płotem, mieć groźnego psa a nawet monitoring. We wszystkich przypadkach najważniejsze były meble i sprzęty, dopiero po odpowiedziach architektów padały odpowiedzi dotyczące wyglądu pomieszczeń, ich wielkości, rozkładu itp. Zauważono również zależność, że jeżeli grupa brała udział w wyjazdach, wycieczkach, o bogatsze i ciekawsze były odpowiedzi.



## Warsztat 2 – Kształt przyjemny i nieprzyjemny

| Kształt   | Ocena         | Komentarze, uwagi, skojarzenia                                 |
|---|---------------|--|
|    | pozytywna 11+ | niebo; chcę mieć na ścianie, albo na suficie, ładny, przyjemny |
|    | pozytywna 9+  | szachy, zabawa, gra  |
|    | pozytywna 8+  | kropla   |
|    | pozytywna 7+  | kwadrat; chcę taki stół  |
|    | pozytywna 6+  | koło, stół, piłka, kula  |
|   | pozytywna 6+  | tęcza, łuk   |
|  | pozytywna 6+  | kwadraty, jak okno   |
|  | pozytywna 6+  | kropki, piłki, kulki, basen z piłkami, zabawa                  |
|  | pozytywna 3+  | podoba mi się  |
|  | pozytywna 2+  | bańki mydlane, plama, farba                                    |
|  | obojętna 0    | kratka, krata, więzienie, obrus, materiał                      |

| Kształt   | Ocena        | Komentarze, uwagi, skojarzenia                   |
|---|--------------|--|
|    | obojętna 0   | plama, bez kształtu, niewyraźny kształt          |
|    | negatywna 2- | trójkąt, ostre rogi, niewygodny                  |
|    | negatywna 2- | nie podoba mi się                                |
|    | negatywna 3- | popękana podłoga, kamienie                       |
|    | negatywna 5- | nie jest po środku, przesunięte, ściana, blokada |
|    | negatywna 5- | deszcz, porzrzućcane                             |
|   | negatywna 7- | krzywe, brzydkie                                 |
|  | negatywna 8- | kurz, brud, rzep                                 |
|  | negatywna 8- | bazgroły, brud, rozmazane, brzydkie              |

Wnioski. Uczestnicy warsztatów poprawnie odczytują kształty i prawidłowo przypisują im znaczenie. Jako pozytywne oceniają symbole symetryczne, duże o pełnych kształtach oraz te, które kojarzą się z zabawą, czasem wolnym, marzeniem. Negatywne kształty są rozedrgane, chaotyczne, przesunięte – ułożone niesymetrycznie na kartoniku. Większość osób nie umiała powiedzieć dlaczego dany kształt jest przyjemny, dopiero po dodatkowych pytaniach i sugestiach prowadzących padały bardziej konkretne odpowiedzi.

Warsztat 3 – Miejsca wspólne

|                          | Dobroszyce – wieś   | Syców – małe miasto  | Wrocław – duże miasto   |
|--------------------------|---|--|---|
| Rodzaj                   | ogród, podwórko   | ogród, boisko, ulica   | boisko, stadion, staw, jezioro, park  |
| Wielkość                 | duża powierzchnia   | duża powierzchnia  | duża powierzchnia   |
| Zieleń                   | drzewa, kwiaty  | drzewa, dużo zieleni, kwiaty, drzewo do liczenia   | park – zieleń między uliczkami, kwiaty, zieleń przy wodzie  |
| Użyte kolory             | tylko kontury, kolory dopasowane do rzeczywistości                                  | bardzo kolorowy rysunek, wypełnienie kolorem, kolor dopasowany do rzeczywistości                                 | grube czarne linie, wynikające z użytego narzędzia, część wypełniona kolorem, podkreślenie wody i zieleni |
| Meble, niezbędne sprzęty | okrągły stół, krzesła, budynki – dyskoteka, pizzeria, ogród, darmowe dla wszystkich | boisko, piłka, basen, okrągły stół z zastawą, grami planszowymi i ciastkami, miejsce na ognisko, kanapy i fotele | boisko, budynki towarzyszące, ścieżki, basen z torami do pływania, woda                                   |

Wnioski. Uczestnicy warsztatów podkreślili, jak ważny jest kontakt z drugim człowiekiem. Chcieliby mieć miejsca wspólne dostępne dla wszystkich, ale też takie tylko dla nich, ich przyjaciół i rodziny. Trudno było otrzymać odpowiedzi o nastroju i klimacie miejsca, częściej padały odpowiedzi dotyczące niezbędnych mebli i urządzeń – hamaki, fotele poduszki, a także konkretnych miejsc – darmowa dyskoteka albo pizzeria. Uczestnicy z Sycowa często zmieniali zdanie pod wpływem kolegów z grupy, rysowali to samo, na jednym arkuszu. Warsztat rysunkowy pokazał wykluczenie niepełnosprawnych z życia społecznego oraz ich wzajemną integrację w domach pomocy społecznej. Każda grupa w inny sposób zobrazowała swoje miejsce w społeczeństwie: Dobroszyce – wykluczenie, chęć zamknięcia, otoczenia się murem, strach, ale jednocześnie marzenie, żeby tak nie było, chęć odmiany społeczeństwa, nie architektury; Syców – integracja grupy niepełnosprawnych w małym mieście, zamknięcie w obszarze miasta, dopuszczenie tylko przyjaciół, rodziny, znanych osób; Wrocław – otwarcie na ludzi.

Warsztat 4 – Ocena architektury (z 26 budynków wybrano skrajne oceny)

|                   | Dobroszyce – wieś   | Syców – małe miasto       | Wrocław – duże miasto                  |
|-------------------|---|---------------------------|--|
| <b>Pozytywnie</b> | dom z bali oraz Biblioteka Narodowa w Pradze biura Future Systems | dom z bali                | Laban Dance Centre, Herzog & De Meuron |
| <b>Negatywnie</b> | Forum Barcelona, Herzog & De Meuron                               | Stata Center, Frank Gehry | Dom bezpieczny, Robert Konieczny       |

Wnioski. To, co jest znane, jest oceniane pozytywnie. Zostały poruszone bardzo ważne aspekty: lęk i bezpieczeństwo. Lęk wywołuje wszystko, co ciemne, krzywe, niesymetryczne, niepodparte i zamknięte (!) – tu bardziej zwracano uwagę na to, że z budynku trudno się wydostać w razie zagrożenia, a nie do niego włączyć.

#### 2.4. Odczucia osób niepełnosprawnych ruchowo

Podczas warsztatów „Architektura dla Wszystkich” w dyskusji ze studentami wzięły udział osoby poruszające się na wózkach. Opowiadały o swoich problemach z barierami architektonicznymi i o tym, co jest dla nich ważne w budynku, co powoduje, że czują się gorsi, wykluczeni, a co im pomaga. Z rozmów wyciągnięto następujące wnioski:

**Komunikacja.** Dobra rampa do budynku to podstawa. Najpierw trzeba się do dostać do środka. Niestety często bywa tak, zwłaszcza w starych, zabytkowych budowlach, że podjazd jest utrudniony, bo nie było miejsca na rampę lub konserwator zabytków nie wyraził na nią zgody. Wtedy stosuje się rozwiązania pośrednie, np. tabliczkę przy wejściu głównym, że wejście dla osoby niepełnosprawnej jest z innej strony budynku lub że należy zadzwonić dzwonkiem po pomocnika. I teraz w ten sposób pojawiają się dwa scenariusze: pierwszy – niepełnosprawny objeżdża budynek, aby znaleźć odpowiednie wejście (często okazuje się, że jest to wejście dostawcze, dla kurierów, pracowników itp.), więc przejeżdża od „zaplecza”, mijając szereg pomieszczeń i korytarzy, aby dostać się w okolice głównego wejścia, gdzie znajduje się cel jego wizyty. Drugi scenariusz jest taki, że po uruchomieniu dzwonka schodzi portier i z pomocą przypadkowego przechodnia wnosi niepełnosprawnego po schodach, tworząc tym samym pewien rodzaj spektaklu na ulicy. Z dwojga złego pierwszy scenariusz jest lepszy, ale należy wyobrazić sobie, że w tym budynku odbywa się ważne wydarzenie i że jednym z honorowych gości jest osoba niepełnosprawna, a ma pokonać drogę od zaplecza. Co wtedy?

**Scena, podest, mównica.** Kontynuuję rozważanie na temat ważnego, niepełnosprawnego gościa i przechodzę „z nim” w głąb budynku. Zakładam, że korytarze są odpowiedniej szerokości, nie ma progów w drzwiach i ościeżnice mają 90 cm szerokości w świetle, a winda obsługująca wszystkie kondygnacje. Przechodzę do Sali wykładowej, auli lub innego pomieszczenia w tym charakterze. Rozpoczynają się przemówienia, podziękowania i ktoś wywołuje naszego honorowego gościa, który porusza się na wózku. Przedstawienie zaczyna się od początku, bo nie ma podjazdu na scenę, mównica jest przystosowana do osoby stojącej, zaczyna się gorączkowe szukanie mikrofonu... Teraz nasuwa się pytanie: ile jest niepełnosprawnych osób, które są gośćmi honorowymi na ważnych wydarzeniach? Pewnie niewielu,

ale ta sama sala może służyć studentom podczas wykładu i wtedy osób na wózkach trochę przybywa. Co jeśli niepełnosprawny student będzie miał pytanie i będzie chciał podjechać do tablicy, żeby je zadać? Co jeśli wykładowca będzie niepełnosprawny?

**Toaleta.** To jest obszerne zagadnienie, dlatego skupiono się na problemie tzw. trzeciej płci. Idziemy korytarzem i na drzwiach widzimy symbole: na pierwszych kółko, na drugich trójkąt, a na trzecich osobę na wózku. Gorszym rozwiązaniem jest kiedy podporządkowujemy niepełnosprawnego mężczyznę do toalety dla kobiet. Może warto pomyśleć o tym, żeby dostosować kabinę, a nie całe pomieszczenie toalety? Wtedy i w męskiej i w damskiej byłoby miejsce dla niepełnosprawnej osoby. Ma to też kolejne zastosowanie, ważne dla osoby, która nie porusza się sama na wózku, czyli taka, która nie może sama przesiąść się z wózka na sedes. W wygodnej toalecie bez przedsionka mamy sytuację taką, że niepełnosprawny wjeżdża z opiekunem. Następnie opiekun zdejmując spodnie niepełnosprawnemu, przenosi go na sedes i wychodzi, a co za tym idzie otwiera drzwi (bez przedsionka) i pokazuje osobom stojącym na korytarzu niepełnosprawnego na toalecie, po krótkim czasie sytuacja się powtarza, ponieważ musi wrócić do środka by niepełnosprawnego wyprowadzić. Oczywiście opiekun może zostać i towarzyszyć osobie niepełnosprawnej podczas załatwiania potrzeb fizjologicznych, co może być niestety bardziej upokarzające.

### 3. Czy budynki dostępne dla wszystkich są ekonomiczne?

Biorąc pod uwagę wyniki badań oraz argumenty, które padły podczas dyskusji oraz fakt, że niepełnosprawnych z roku na rok przybywa, odpowiedź na powyższe pytanie jest twierdząca.

Należy zaznaczyć, że oceniając budynek pod względem ekonomicznym nie patrzy się na aspekt wyboru tańszych materiałów czy rozwiązań konstrukcyjnych oraz możliwość zastosowania alternatywnych źródeł energii, gdyż jest to rozważanie na osobny artykuł. Bierze się natomiast pod uwagę wielkość działki, wielkość powierzchni komunikacyjnych w stosunku do pozostałych, wielkość i wysokość budynku, zastosowanie ramp, podnośników i wind, ilość zużytych materiałów budowlanych. Projektując budynki „przyjazne” dla wszystkich, należy brać pod uwagę rozwiązania, które podnoszą koszty inwestycji przez stosowanie większej powierzchni komunikacyjnej, a co za tym idzie często potrzebują większej działki lub większej ilości kondygnacji oraz większej ilości materiałów budowlanych, nakładów pracy oraz stosowania w nich wind itd. Gdzie więc ekonomia rozwiązań? Aby odpowiedzieć na to pytanie, należy rozważyć różne typy budowli. Zaczniemy od domów jednorodzinnych, gdzie inwestorem jest osoba prywatna. W tym wypadku argumentem za budowaniem uniwersalnym przemawia jedynie argument komfortu. Żyjemy w tzw. starzejącym się społeczeństwie, oznacza to, że musimy sami sobie radzić pod koniec naszego życia i jeżeli budujemy sobie dom zgodnie z wytycznymi projektowania uniwersalnego, to do końca życia będziemy w stanie z niego korzystać, mamy zapewniony komfort psychiczny, że nie musimy się martwić, co zrobimy jak nie będziemy w stanie poruszać się o własnych siłach, ulegniemy wypadkowi itp. Więcej argumentów za budownictwem dla wszystkich przemawia w obiektach komercyjnych i użyteczności publicznej. Jeżeli budynek jest dostępny, zwiększa się liczba odbiorców usług, sprzedanych biletów, towarów itd., zwiększa się zysk inwestora. Jeżeli jest to budynek biurowy i inwestor ma możliwość zatrudniania osób niepełnosprawnych, dostaje dotacje na ten cel. Zyskuje też państwo, bo im więcej niepełnosprawnych pracuje, tym mniej jest na zasiłku, zmniejsza się bezrobocie.

Mówiąc o budynku ekonomicznym, musimy brać pod uwagę aspekt nie tylko finansowy, ale także społeczny. Jeżeli jest on dostępny i „przyjazny” jest chętniej odwiedzany, jest reklamą samą w sobie, nie potrzebuje promocji, organizowania nadzwyczajnych wydarzeń ściągających tłumy. Przestrzeń, w której dobrze czuje się każdy – wiadomość o istnieniu takiego miejsca roznosi się przez jej użytkowników, którzy proponują to miejsce swoim bliskim.

#### 4. Wnioski

Obecnie w Unii Europejskiej ponad 14% społeczeństwa jest niepełnosprawne. Rozwój medycyny i wydłużanie się wieku ludzi powoduje, że procent niepełnosprawnych będzie się zwiększał. Do tego dochodzą osoby, które są niepełnosprawne czasowo, np. przez złamanie nogi czy inny, uleczalny defekt. Tak jak już wspomniano na początku artykułu, niepełnosprawnym jest każdy, kto nie może w pełni skorzystać z obiektu architektonicznego. Inwestorzy, projektanci i użytkownicy muszą zdać sobie sprawę, że budynek ma służyć każdemu człowiekowi, bardziej sprawnym, silniejszym i tym słabszym, że każda oszczędność na powierzchni komunikacyjnej, w umeblowaniu, wyposażeniu, może mieć poważne konsekwencje dla komfortu, odbioru otoczenia i wnętrza budowli. Budynek nie może być normowym minimum, bo sytuacja zmienia się z roku na rok. Artykuł niesie za sobą przesłanie kierowane nie tylko do osób związanych z projektowaniem architektury, ale także przestrzeni miejskiej, środków transportu i komunikacji: „Niepełnosprawnym można się urodzić, niepełnosprawnym można się stać w wyniku nieszczęśliwego wypadku, ale również niepełnosprawności można dożyć”<sup>3</sup>. Dlatego myśląc o niepełnosprawnych, należy również myśleć też o sobie.

#### Literatura

- [1] Kuryłowicz E., *Projektowanie uniwersalne: udostępnianie otoczenia osobom niepełnosprawnym*, wydawnictwo: we współpracy z Fundacją Osób Niepełnosprawnych, Warszawa 1995.
- [2] Kępiński A., *Lęk*, Wydawnictwo Literackie, Kraków 2002.
- [3] Clarke D., *Zachowania prospołeczne i antyspołeczne*, Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne, Gdańsk 2005.
- [4] Heis O., Degenhart Ch., Ebe J., *Barrier-Free Design*, Detail Practice, 2010.
- [5] Wysocki M., *Dostępna przestrzeń publiczna*, Kraków 2009.

---

<sup>3</sup> Słowa zasłyszane podczas warsztatów „Architektura dla wszystkich”.

PIOTR JAN SULICH\*

## WYKORZYSTANIE ANALOGII RÓWNAŃ RÓŻNICZKOWYCH DO MODELOWANIA KOŚCI

---

### THE ANALOGY BETWEEN THE DIFFERENTIAL EQUATIONS USED TO MODELLING OF THE BONE

#### Streszczenie

Niniejszy artykuł wskazuje na stosunkowo prosty sposób stworzenia porowatego modelu kości. Proponowane rozwiązanie to wskazanie na podobieństwo pomiędzy strukturą kości oraz gruntem rozumianym jako układ wielofazowy, a następnie wykorzystanie analogii matematycznej pomiędzy równaniami: konsolidacji gruntu (Terzagiego) oraz transportu ciepła (Fouriera-Kirchhoffe'a).

*Słowa kluczowe: porowaty model kości, MES (metoda elementów skończonych)*

#### Abstract

This paper suggests a relatively simple way to create a model of porous bone. The proposed solution is an indication of the similarity between the structure of the bones and the soil is understood as a multi-phase system, then use a mathematical analogy between the equations of soil consolidation (Terzaghi) and heat transfer (Fourier-Kirchhoffe).

*Keywords: model of porous bone, FEM (finite-element method)*

---

\* Mgr inż. Piotr Jan Sulich, Instytut Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## Oznaczenia

|                          |   |   |
|--------------------------|---|---|
| $A$                      | – | nieuszkodzona powierzchnia  |
| $A_1^*, A_2^*, A_3^*$    | – | aktualna powierzchnia nośna   |
| $A_D$                    | – | powierzchnia sferycznych pustek (uszkodzona)  |
| $A_c$                    | – | całkowite pole powierzchni  |
| $A_s$                    | – | pole powierzchni styku cząstek  |
| $c$                      | – | współczynnik konsolidacji   |
| $c_v$                    | – | ciepło właściwe   |
| $e$                      | – | porowatość  |
| $E$                      | – | moduł Younga  |
| $f_n$                    | – | gęstość objętościowa nukleacji  |
| $f_v$                    | – | aktualna gęstość objętościowa pustek  |
| $f_v^*$                  | – | efektywna gęstość objętościowa pustek   |
| $f_{cr}$                 | – | krytyczna wartość gęstości objętościowej pustek   |
| $G$                      | – | moduł Kirchhoffe'a (moduł sprężystości poprzecznej)   |
| $h_3$                    | – | wysokość ponad poziomem porównawczym (do którego podniósł się poziom cieczy w piezometrze powyżej próbki) |
| $h_4$                    | – | wysokość ponad poziomem porównawczym (do którego podniósł się poziom cieczy w piezometrze poniżej próbki) |
| $i$                      | – | spadek hydrauliczny   |
| $k$                      | – | współczynnik filtracji Darcy'ego  |
| $k_{ij}$                 | – | współczynnik filtracji w postaci tensorowej   |
| $k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}$ | – | współczynniki filtracji gruntu w kierunkach $x, y, z$   |
| $K$                      | – | moduł Helmholtza (moduł odkształcalności objętościowej)   |
| $L$                      | – | długość próbki  |
| $m_v$                    | – | współczynnik zmiany objętości gruntu  |
| $p$                      | – | ciśnienie w wodzie, znajdującej się w porach gruntu   |
| $p(x, t)$                | – | funkcja ciśnienia   |
| $p_p$                    | – | kumulowane odkształcenie plastyczne   |
| $p_s$                    | – | ciśnienie w miejscu styku cząstek   |
| $q_1, q_2, q_3$          | – | dotychczasowe parametry dodane przez Tvergarda i Nedelmana  |
| $Q$                      | – | wydatek przepływu   |
| $S$                      | – | współczynnik wilgotności  |
| $s_n$                    | – | średnie odchylenie naprężenia zniszczenia   |
| $t$                      | – | czas  |
| $T(x, t)$                | – | funkcja temperatury   |
| $v$                      | – | prędkość filtracji  |
| $V_p$                    | – | objętość porów (pustek)   |
| $V_s$                    | – | objętość materiału zwartego   |
| $\alpha$                 | – | współczynnik rozszerzalności termicznej   |
| $\hat{\alpha}$           | – | pseudo-współczynnik rozszerzalności termicznej  |
| $\epsilon_{ij}^e$        | – | odkształcenia sprężyste   |
| $\epsilon_{ij}^{th}$     | – | odkształcenia termiczne   |
| $\epsilon_v$             | – | odkształcenie objętościowe  |



|  |   |  |
|--|---|--|
| $\varepsilon_n$                            | – | średnie odkształcenie odpowiadające nukleacji                |
| $\gamma_w$                                 | – | ciężar właściwy wody   |
| $\lambda_{xx}, \lambda_{yy}, \lambda_{zz}$ | – | współczynniki przewodności termicznej w kierunkach $x, y, z$ |
| $\rho$                                     | – | gęstość  |
| $\sigma'$                                  | – | (ciśnienie) efektywne  |
| $\sigma_{ij}^e$                            | – | naprężenia sprężyste   |
| $\sigma_H$                                 | – | naprężenie średnie   |
| $\sigma_{ij}^{\text{por}}$                 | – | naprężenia pochodzące od zmiany ciśnienia w ciele porowatym  |
| $\nu$                                      | – | współczynnik Poissona  |

## 1. Wstęp

Obserwacje przyrody często stawały się inspiracją dla inżynierów. Z łatwością dostrzegamy pewne analogie. Zagłębiając się w anatomię człowieka i analizując mechanikę gruntu, także można dojść do ciekawych wniosków. Układ szkieletowy człowieka to ponad 200 kości, które są zbudowane z dwóch warstw: zewnętrznej i wewnętrznej. Istota zbita i gąbczasta, wraz z siecią naczyń krwionośnych i nerwów tworzą strukturę porowatą kości [5]. W mechanice gruntów grunt to układ wielofazowy. Stanowi on kombinację stałych cząstek mineralnych oraz pustych przestrzeni wypełnionych gazem lub wodą [10, 19]. Rozpatrując strukturę kości i gruntu, łatwo można dostrzec, że łączącym elementem jest ośrodek porowaty. Dzięki tej analogii można spróbować opisać kość za pomocą równań mechaniki gruntów.

Celem niniejszego artykułu jest analiza możliwości wykorzystania modelu ciała porowatego, opartego na mechanice gruntów, opisanego równaniem Terzagiego, jako modelu mechanicznego kości długiej. Posłużyć ma do tego stworzony model obliczeniowy kości oparty na analogii pomiędzy równaniami Fouriera-Kirchhoffe'a oraz Terzagiego.

## 2. Przegląd literatury

Analogia pomiędzy układem wielofazowym gruntu oraz porowatą strukturą kości, musiała prędzej czy później zaowocować. Równania K. Terzagiego i M.A. Biota uznaje się za kluczowe w opisie ośrodka porowatego w geotechnice [10, 14, 19]. Założenie Biota polega na potraktowaniu cząstek ośrodka gruntowego za nieściśliwe, co prowadzi do naprężenia efektywnego, proponowanego przez Terzagiego. Kluczową sprawą pozostaje mikrostruktura [14]. Teoria znalazła powszechnie zastosowanie do problemów konsolidacji gleby w geotechnice, a zwłaszcza do problemów zmechaniki skał. Użycie sformułowań porospężystości do modelowania kości jest w pełni uzasadnione, wskazuje na to podobieństwo właściwości tkanki kostnej oraz wartości modułów konstytutywnych dla materiałów porowatych, np. kamieni, marmurów czy granitów [6, 8]. Stosowanie teorii porospężystości daje obiecujące rezultaty.

### 3. Opis anatomiczny kości

Struktura i ukształtowanie kości w ciele człowieka zostały dostosowane do odpowiednio spełnianych funkcji. Tym samym na drodze ewolucji kształt kości i jej własności mechaniczne przybrały odpowiednie parametry, przypisane realizowanym zadaniom [3]. Spośród kości wchodzących w skład układu szkieletowego człowieka można wyróżnić podział ze względu na kształt: kości długie (łac. *ossa longa*), kości płaskie (łac. *ossa plana*), kości krótkie (łac. *ossa brevia*) oraz kości różnokształtne (łac. *ossa multiformia*) [1, 5, 11, 16].

Na poziomie makroskopowym kość zbudowana jest z kilku warstw. Najbardziej zewnętrzna, zapewniająca gładką powierzchnię kości, stanowi okostna [5]. Następnie można wyróżnić dwie podstawowe tkanki: zbitą (korową) i gąbczastą (beleczkową lub trabekularną). Pierwsza stanowi część zewnętrzną kości, druga wewnętrzną [3, 5]. W skład części korowej wchodzi warstwa blaszek kostnych i osteony z kanałami Haversa, wraz z naczyńcami, nerwami i tkanką łączną. Sieć połączeń uzupełniają, poprzecznie i skośnie usytuowane, kanały Volkmana. Linie kostniny (spojenia lub spoiny) tworzą zewnętrzną powierzchnię osteonu [1, 3]. Część gąbczasta kości nazywana jest beleczkową lub belkowatą ze względu na krótkie belecзки kostne, z których się składa [3, 5]. Rozłożenie istoty zbitej i gąbczastej jest odmienne w różnych rodzajach kości. Trzon kości długiej tworzy prawie wyłącznie kość zbita. Natomiast kość gąbczasta zdecydowanie przeważa w nasadowej części kości, gdzie istota zbita stanowi cienką powłokę [5].

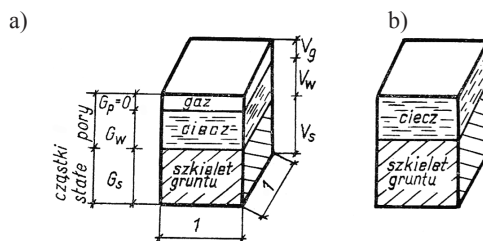
Z biologicznego punktu widzenia kość stanowi tkankę łączną. Ogólne zadanie tego rodzaju tkanki to: wiązanie poszczególnych elementów ze sobą i pełnienie roli podpory [3]. Tkanka kostna należy do grupy tzw. tkanek szkieletowych. Tworzą ją komórki kostne i przesycona solami nieorganicznymi wapnia, twarda substancja międzykomórkowa [3]. Kość często bywa porównywana do materiału kompozytowego, ze względu na osobliwe połączenie składników organicznych i substancji nieorganicznych [3, 8, 15]. Główne jej składniki to: twarda część mineralna utworzona z hydroksyapatytu, elastyczna część białkowa zbudowana z kolagenu oraz część płynna [3, 8]. Można wyróżnić trzy rodzaje komórek kostnych: osteocyty, osteoblasty i osteoklasty. Pierwsze są żywymi komórkami, występują w zróżnicowanych ilościach oraz przestrzennym uporządkowaniu [1, 3]. Komórki mające podstawowe znaczenie w tworzeniu i regeneracji kości to osteoblasty. Tworzą one substancję międzykomórkową. Osteoblasty mają wielokątne i owalne kształty, z licznymi wypustkami, które pozwalają łączyć się z innymi komórkami [3]. W trakcie kostnienia tworzą formy beleczek oraz blaszek [15]. Po ukończeniu swojej funkcji i zabudowaniu się w jamie kostnej stają się osteocytami [3]. Z tego względu osteoblasty noszą nazwę komórek kościotwórczych [1, 15, 16]. Ostatnie, osteoklasty to wielojądrzaste komórki, które towarzyszą w procesie rozpuszczania i nadbudowy tkanki kostnej [3, 15].

Z punktu widzenia mechaniki tkanka kostna jest materiałem niehomogenicznym, porowatym, o własnościach anizotropowych [3, 6]. Porowatość tkanek szacuje się od 5% do nawet 95% [6]. Porowatość tkanki trabekularnej, znajdującej się m. in. w nasadach kości długich, osiąga od 50 do 95% [6]. Pory są połączone i wypełnione szpikiem kostnym, natomiast macierz kostna ma postać płytek i beleczek o grubości 200  $\mu\text{m}$ . Belecзки charakteryzują się zmiennym układem [6]. Tkanka korowa wykazuje mniejszą porowatość w stosunku do gąbczastej, bo od 5 do 10% [6]. Jest jednak bogatsza ze względu na różnorodność porów, jakie można wyszczególnić. Największe pory mają około 30–70  $\mu\text{m}$  i jest to średnica kanałów Haversa oraz kanałów Volkmana [3, 6, 9]. Drugie co do wielkości są przestrzenie, wielkości 0,1  $\mu\text{m}$ ,

między warstwami koncentrycznymi i włóknami kolagenowymi, tworzącymi koncentryczne blaszki i osteony [6, 9]. Wreszcie luki między lamelami, tj. włóknami kolagenowymi i hydroksyapatytem, tworzą sieć bardzo małych – około 10 nm, połączonych kanalików [9].

#### 4. Wykorzystanie modelu gruntu do opisu struktury kości

Mechanika gruntu to dział zajmujący się warunkami równowagi oraz odkształceniami zachodzącymi w wyniku działania sił w ośrodkach skalnych okruchowych i rozdrobnionych [10]. Przedmiotem badań jest grunt występujący w przyrodzie, materiał budowlany wykonany z gruntu przez człowieka, a także jego współdziałanie z innymi materiałami [10, 19]. Szczególnie interesujący, z punktu widzenia dalszej części pracy, jest opis własności fizycznych i mechanicznych, wynikający z charakterystycznych cech gruntu, do których należą m.in.: porowatość oraz brak jednorodności. W celu lepszego zrozumienia tych właściwości w powiązaniu z naprężeniami efektywnymi i przepływem cieczy, przybliżone zostaną prawa: K. Terzagiego (1) i H. Darcyego (2).



Rys. 1. Fazy w gruncie: a) układ trójfazowy, b) układ dwufazowy [8]

Fig. 1. Phase in the ground: a) three-phase system, b) two-phase system [8]

Postępując zgodnie z zasadami mechaniki gruntów, należy pamiętać, że przedmiot badań stanowi układ wielofazowy. W celu ułatwienia analizy i przedstawienia zależności pomiędzy fazami powszechnie stosuje się poglądowy rysunek (rys. 1). W układzie wyróżnia się: szkielet gruntu, czyli stałe cząstki mineralne, nie przylegające ściśle do siebie oraz puste przestrzenie – pory, które mogą być wypełnione cieczą lub gazem [10, 19].

Analizując naprężenia powstałe pod wpływem działania obciążenia na grunt nawodniony (rys. 1), można dojść do bardzo ważnego prawa zaproponowanego przez K. Terzagiego (2) [10, 19].

$$\sigma = \sigma' + (1 - a)p \quad (1)$$

$$\sigma' = \sigma - p \quad (2)$$

gdzie:

$\sigma'$  – naprężenie (ciśnienie) efektywne

$p$  – ciśnienie w wodzie, znajdującej się w porach gruntu

$$a = \frac{A_s}{A_c} \Rightarrow a \ll 1$$

$A_c$  – całkowite pole powierzchni

$A_s$  – pole powierzchni styku cząstek

Bardzo ważnym zagadnieniem w mechanice gruntów jest przepływ cieczy i jej wpływ na naprężenia efektywne [12]. Należy podkreślić, że możliwości przepływu wynika z obecności struktury porowatej. Przepływ w próbce gruntu z punktu A do punktu B odbywa się od poru do poru. Rozważania te prowadzą wprost do odkrytej zależności określanej prawem H. Darcy'ego (3) [12, 19].

$$Q = k \frac{h_3 - h_4}{L} A = kiA \quad (3)$$

gdzie:

- $Q$  – wydatek przepływu
- $k$  – współczynnik filtracji Darcy'ego
- $h_3$  – wysokość ponad poziomem porównawczym (do którego podniósł się poziom cieczy w piezometrze powyżej próbki)
- $h_4$  – wysokość ponad poziomem porównawczym (do którego podniósł się poziom cieczy w piezometrze poniżej próbki)
- $L$  – długość próbki
- $A$  – pole przekroju poprzecznego próbki gruntu
- $i$  – spadek hydrauliczny

W celu uzyskania podstawowego równania przepływu w gruncie należy wyodrębnić myślowo elementarny sześciąt o wymiarach  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ . W elemencie występuje przepływ  $Q$  o składowych kierunkach  $x$ ,  $y$ ,  $z$  [10, 12]. Korzystając z prawa H. Darcy'ego (2) oraz zapisu wektorowego, można napisać wyrażenia na poszczególne składowe przepływu [12]. Dodatkowo zakładamy, że współczynniki filtracji są stałe (4):

$$\frac{\partial k_{xx}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial k_{yy}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial k_{zz}}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

W wyniku prostych przekształceń równania dla przepływu trójkierunkowego, otrzymujemy równanie konsolidacji gruntu, nazywane inaczej równaniem Terzaghiego, dla materiału ortotropowego (5):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \gamma_w \frac{\partial(S m_v)}{\partial t} \quad (5)$$

gdzie:

- $k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}$  – współczynniki filtracji gruntu w kierunkach  $x$ ,  $y$ ,  $z$
- $\gamma_w$  – ciężar właściwy wody
- $m_v$  – współczynnik zmiany objętości
- $m_v = \frac{V_p}{V} = \frac{e}{1+e}$
- $V$  – objętość elementu gruntu
- $V_p$  – objętość porów
- $e$  – porowatość
- $S$  – współczynnik wilgotności
- $S = \frac{V_w}{V_p}$
- $V_w$  – objętość wody w elemencie gruntu

$t$  – czas  
 $p(x, t)$  – funkcja ciśnienia

Równanie konsolidacji gruntu (5), można przedstawić także jako (6):

$$\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{\partial(S m_v)}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (6)$$

Wyrażenie  $\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}$  oznacza wzrost odkształcenia objętościowego w funkcji czasu.

Odkształcenie objętościowe zależy od stanu naprężeń czynnych (7).

$$\varepsilon_v = f(\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3) \quad (7)$$

Po uwzględnieniu prawa Terzagiego (1) i założenia stałej wartości obciążenia (8), otrzymamy równanie konsolidacji gruntu (9):

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_2}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_3}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{E}{3(1-2\nu)} \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = -\gamma_w \frac{\partial p}{\partial t} \quad (9)$$

gdzie:

$\nu$  – współczynnik Poissona  
 $E$  – moduł Younga

Zakładamy, że współczynniki filtracji są takie same we wszystkich kierunkach (10):

$$k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = k = \text{const} \quad (10)$$

Podstawiając założenie (10) do wyrażenia (9), otrzymujemy równanie Terzagiego dla materiału izotropowego (11).

$$c \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = -\gamma_w \frac{\partial p}{\partial t} \quad (11)$$

$$c = k \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (12)$$

gdzie:

$c$  – współczynnik konsolidacji  
 $k$  – współczynnik filtracji

Sposób obliczania naprężeń pochodzących od zmiany ciśnienia w ciele porowatym jest możliwy dzięki sprzężeniu pomiędzy równaniem Terzagiego, a równaniami sprężystości. Wykorzystujemy sprzężenie na poziomie naprężeń. Zgodnie z prawem Terzagiego (2) można zapisać równanie (13) [6, 12]:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij}^e - \sigma_{ij}^{\text{por}} \quad (13)$$

gdzie:

$\sigma_{ij}^e$  – naprężenia sprężyste

$\sigma_{ij}^{\text{por}} = p\delta_{ij}$  – naprężenia pochodzące od zmiany ciśnienia w ciele porowatym

Rozpisując równanie (13) oraz dokonując prostych przekształceń, otrzymujemy (14):

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{E} \left[ (1 + \nu)\sigma_{ij} - \nu\sigma_{kk}\delta_{ij} \right] - \hat{\alpha} p\delta_{ij} \quad (14)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + 2\nu}{E} \quad (15)$$

gdzie:

$\hat{\alpha}$  – pseudo-współczynnik rozszerzalności termicznej

$p$  – zmiana ciśnienia

W mechanice gruntów grunt to układ wielofazowy. Stanowi on kombinację stałych cząstek mineralnych oraz pustych przestrzeni wypełnionych gazem lub wodą [10, 19]. Rozpatrując strukturę kości i gruntu, można łatwo dostrzec, że łączącym elementem jest ośrodek porowaty. O podobieństwie świadczą zarówno różne stopnie porowatości piasku, ilów oraz kości zbitej i gąbczastej, jak i przepływający płyn, będący pod ciśnieniem. Jak wykazano, dzięki sprzężeniu równań sprężystości z równaniem Terzagiego, można obliczyć naprężenia wynikające ze zmiany ciśnienia w ciele porowatym. Dlatego też próba opisu kość za pomocą równań mechaniki gruntów wydaje się uzasadniona.

## 5. Model numeryczny

Podstawowym narzędziem obliczeniowym inżyniera XXI wieku stała się metoda elementów skończonych (*Finite Element Method* – FEM lub *Finite Element Analysis* – FEA) [4, 13]. Główna korzyść płynąca ze stosowania MES, m.in. w biomechanice i bioinżynierii, to możliwość optymalizacji na etapie modelu, np. różnego rodzaju implantów chirurgicznych. Ponadto symulacja komputerowa umożliwia sprawdzenie zmian zachowania konstrukcji, przy zmiennych parametrach pracy. Dzięki temu zmniejszają się koszty i okres od powstania pomysłu do jego realizacji [4].

Z punktu widzenia pracy, interesuje nas możliwość wykorzystania modelu ciała porowatego opisanego równaniem Terzagiego jako modelu mechanicznego kości długiej. Posłużyć ma do tego stworzony model obliczeniowy kości, oparty na równaniu Terzagiego oraz model numeryczny wykonany w pakiecie obliczeniowy Ansys v. 11 – opartym na metodzie elementów skończonych. Niestety w pakiecie tym nie dysponujemy elementem opisującym ciało porowate w zakresie sprężystym. Można jednak wykorzystać analogię pomiędzy sformułowaniem termosprężystości a sprzężeniami pomiędzy równaniami Terzagiego oraz równaniami sprężystości.

Równanie transportu ciepła, nazywane inaczej równaniem Fouriera-Kirchhoffe'a, dla materiału ortotropowego ma postać (16):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (16)$$

gdzie:

- $\lambda_{xx}, \lambda_{yy}, \lambda_{zz}$  – współczynniki przewodności termicznej w kierunkach  $x, y, z$
- $\rho$  – gęstość
- $c_v$  – ciepło właściwe
- $t$  – czas
- $T(x, t)$  – funkcja temperatury

Zakładamy, że współczynniki przewodności termicznej są takie same we wszystkich kierunkach (17):

$$\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda = \text{const} \quad (17)$$

Podstawiając założenie (17) do równania (16), otrzymujemy równanie Fouriera-Kirchhoffe'a dla materiału izotropowego (18):

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (18)$$

Obliczenie naprężeń, jest możliwe dzięki sprzężeniu pomiędzy: równaniem Fouriera-Kirchhoffe'a a równaniami sprężystości. Wykorzystujemy sprzężenie na poziomie odkształceń (19):

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^{th} \quad (19)$$

gdzie:

- $\varepsilon_{ij}^e$  – odkształcenia sprężyste
- $\varepsilon_{ij}^{th}$  – odkształcenia termiczne

Rozpisując powyższe równanie (19), otrzymujemy (20):

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{E} \left[ (1 + \nu) \sigma_{ij} - \nu \sigma_{kk} \delta_{ij} \right] - \alpha \Delta T \delta_{ij} \quad (20)$$

gdzie:

- $\alpha$  – współczynnik rozszerzalności termicznej
- $\Delta T$  – zmiana temperatury

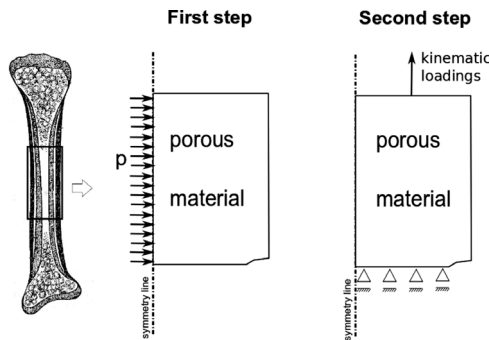
W celu wykazania możliwości zastosowania równań mechaniki gruntów, modelowaniu w pakiecie Ansys v. 11, podlegała ludzka kość długa, a ściślej kość udowa. Symulacje przeprowadzono dla modelu o parametrach odpowiadających kości żywej (tabela 1). Analizę podzielono na dwa etapy: pseudo-termiczną oraz strukturalną. W wyniku pierwszej mamy poznać rozkład ciśnienia w funkcji promienia modelowanej kości. Natomiast druga pozwoli określić mapę naprężeń i odkształceń rozciąganego modelu.

W modelu numerycznym uwzględniono wyłącznie część trzonową kości, obciążoną ciśnieniem wewnętrznym. W drugim kroku model został poddany rozciąganiu, przy czym uwzględniono podparcie umożliwiające przemieszczenie promieniowe. Dalsze uproszczenia wynikały z geometrii kośćca oraz wielkości i kształtu analizowanej części (rys. 2). Przyjęto, że tworzy ją osiowosymetryczny, drążony walec (cylinder walcowy) (rys. 14), a wymiary cylindra odwzorowującego trzon kości to: średnica wewnętrzna  $d_w = 16,39$  mm oraz średnica zewnętrzna  $d_z = 37,24$  mm (przybliżone wartości określone eksperymentalnie).

Stałe materiałowe kości żywej

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| moduł Younga [3]                 | $E = 17,6 \text{ GPa}$                          |
| współczynnik Poissona [9]        | $\nu = 0,33$                                    |
| ciśnienie wewnątrz kości [9]     | $p = 40 \text{ mmHg}$                           |
| współczynnik porowatości [9, 10] | $e = 0,05$                                      |
| współczynnik filtracji [9, 10]   | $k = 1,5-2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$          |
| gęstość [4]                      | $\rho = 1,94-2,02 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ |

Pakiet obliczeniowy Ansys v. 11 umożliwia przeprowadzenie analizy termicznej, a następnie strukturalnej (mechanicznej). W pierwszej części został wykorzystany element typu termicznego, drugiego rzędu, ośmiowęzłowy, osiowoosymetryczny – Plane 77. Jego odpowiednikiem w drugiej części analizy jest element strukturalny – Plane 82 lub Plane 183 [2].



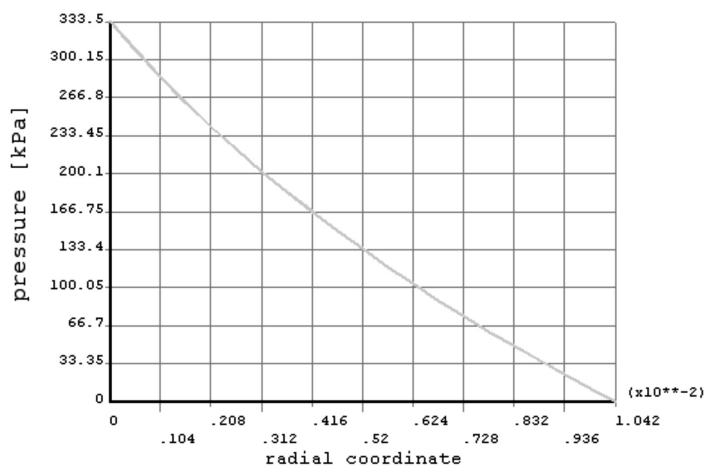
Rys. 2. Proponowany model geometryczny kości i warunki brzegowe

Fig. 2. The proposed geometrical model of bone and boundary conditions

Wykorzystując analogię między wyprowadzonymi równaniami (11) oraz (18), stopniem swobody w każdym elemencie siatki zamiast temperatury  $T$  będzie ciśnienie  $p$ . Z tego względu w dalszej części pracy, analiza termiczna zostanie zastąpiona analizą pseudotermiczną. Zgodnie ze wspomnianą analogią równań przez współczynnik przewodności termicznej  $\lambda_{ij}$  należy rozumieć równoważny mu współczynnik konsolidacji  $c$ . Podobnie iloczynowi  $\rho c_{,v}$  odpowiada ciężar właściwy  $\gamma_w$ . Efektem końcowym analizy pseudotermicznej jest znalezienie rozkładu ciśnienia (rys. 3).

W pakiecie obliczeniowym Ansys v. 11 po przeprowadzeniu analizy pseudotermicznej oraz określeniu rozkładu ciśnienia przechodzimy do analizy strukturalnej (mechanicznej). Analiza jest przeprowadzana w dalszym ciągu na tym samym modelu, tzn. uproszczenia geometryczne, parametry i stałe materiałowe kości żywej pozostają takie same, jak w analizie pseudotermicznej.





Rys. 3. Rozkład ciśnienia po analizie pseudotermicznej względem promienia modelowanej kości

Fig. 3. Pressure distribution in function of the radius in the pseudo-thermal analysis in model of bone

Określenie funkcji opisujących geometrię i strukturę kośćca jest bardzo złożonym problemem. Wiele zjawisk i mechanizmów zachodzi w kości równocześnie. Niesamowicie ważnym procesami są: zniszczenie kości oraz przebudowa tkanki kostnej tzw. *remodeling*. Zarówno w jednym, jak i drugim procesie mamy do czynienia z przebudową tkanki kostnej, a co za tym idzie ulega zmianie także porowatość. W celu zamodelowania zniszczenia kości próbowano zastosować model Gursona-Tvergaard-Needelmana (GTN), służący do obliczania ewolucji uszkodzenia w ośrodku porowatym. Powierzchnia plastyczności (potencjał plastyczny) (21) jest opisany jako funkcja naprężenia średniego naprężenia efektywnego oraz aktualnej gęstości pustek [18]:

$$F = F(\sigma_{ij}, \sigma_s, f_v) = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_s^2} + 2q_1 f_v^* \cosh\left(\frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_H}{\sigma_s}\right) - (1 + q_3 f_v^*)^2 = 0 \quad (21)$$

gdzie:

$q_1, q_2, q_3$  – dodatkowe parametry dodane przez Tvergarda i Needelmana

$\sigma_{eq} = J_2(\sigma_{ij}) = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}}$  – naprężenie efektywne

$\sigma_H = \frac{1}{3} \sigma_{kk}$  – naprężenie średnie

$f_v^*$  – efektywna gęstość objętościowa pustek

$f_v^* = \begin{cases} f_v & \text{dla } f_v \leq f_{cr} \\ f_{cr} + \kappa(f_v - f_{cr}) & \text{dla } f_v > f_{cr} \end{cases}$

$f_{cr}$  – krytyczna wartość gęstości objętościowej pustek

$f_v$  – aktualna gęstość objętościowa pustek

$$f_v = \frac{V_p - V_s}{V_s}$$

$$\frac{V_p}{V_s}$$

- objętość porów (pustek)
- objętość materiału zwartego

Gęstość objętościowa pustek  $f_v$  podlega ewolucji wraz z nukleacją  $f_{nucl}$  i wzrostem  $f_{growth}$  [18]:

$$f_v^* = f_{nucl}^* + f_{growth}^* \quad (22)$$

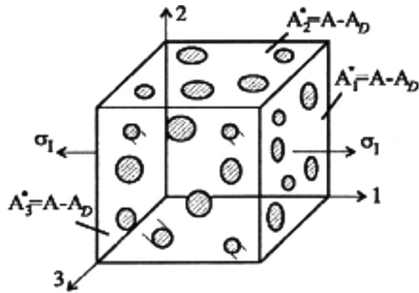
$$f_{nucl}^* = A_n p_p^* \quad (23)$$

$$f_{growth}^* = (1 - f_v) \epsilon_{kk}^* \quad (24)$$

$$A_n = \frac{f_n}{s_n \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{p_p - \epsilon_n}{s_n} \right)^2 \right] \quad (25)$$

gdzie:

- $p_p$  – kumulowane odkształcenie plastyczne
- $f_n$  – gęstość objętościowa nukleacji
- $s_n$  – średnie odchylenie naprężenia zniszczenia
- $\epsilon_n$  – średnie odkształcenie odpowiadające nukleacji



- $A_1^*, A_2^*, A_3^*$  – aktualna powierzchnia nośna
- $A$  – nieuszkodzona powierzchnia
- $A_D$  – powierzchnia sferycznych pustek (uszkodzona)

Rys. 4. Redukcja powierzchni nośnej niezależnie od kierunku naprężenia w modelu GTN [18]

Fig. 4. Reduction of the support surface independently of the direction of stress in GTN model [18]

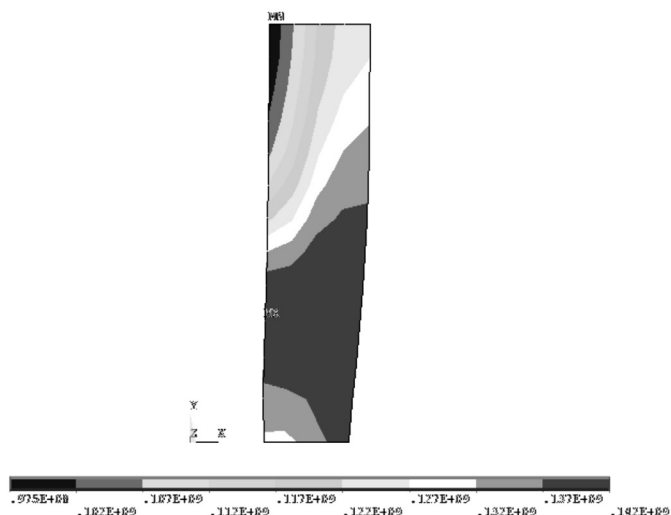
Uzasadnienie wyboru modelu wynika z analogii pomiędzy strukturą porowatą kości a sferycznymi pustkami wywołującymi redukcję powierzchni nośnej (rys. 4). W takim wypadku ośrodek porowaty jest ciałem z częściowo rozwiniętym procesem uszkodzenia. Dodatkowym atutem jest prostota i łatwość zastosowania modelu ewolucji uszkodzenia, w znakomity sposób oddającego zmianę porowatości. Wreszcie Model GTN jest dostępny w pakiecie obliczeniowym Ansys v. 11, co było argumentem wykorzystania go przy próbach symulacyjnych.

Procedura na etapie analizy mechanicznej wymaga podania parametrów modelu GTN (tabela 2). Większość z nich określa się fenomenologicznie [18].

Stałe materiałowe dla modelu GTN

| $q_1$ | $q_2$ | $q_3$     | $f_n$ | $f_{cr}$     | $\epsilon_n$ | $s_n$ | $\sigma_o$ |
|-------|-------|-----------|-------|--------------|--------------|-------|------------|
| 1,25  | 1,0   | $q_1 q_2$ | 0,04  | $f_{cr} = e$ | 0,3          | 0,1   | 107 MPa    |

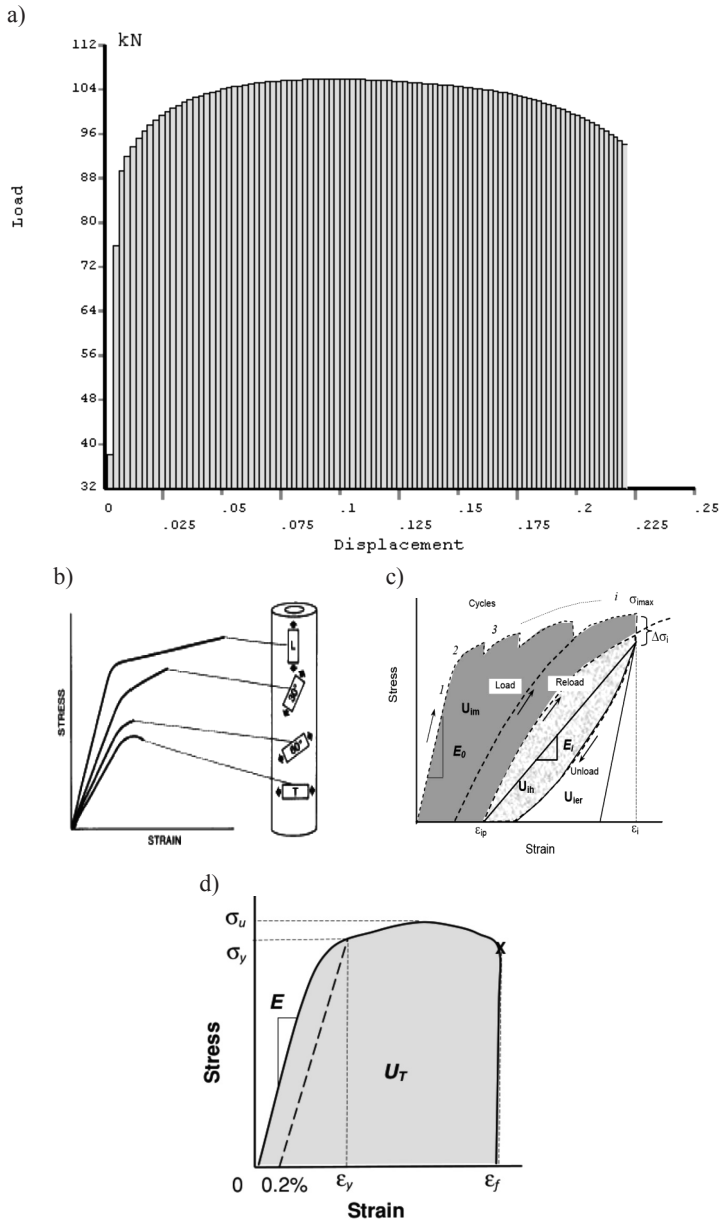
Przypisane zostają odpowiednie stałe użyte wcześniej, a także pseudo-współczynnik rozszerzalności termicznej  $\alpha$  (15). Wraz z przejściem do analizy strukturalnej następuje odczyt rozkładu ciśnienia (tak należy odczytywać rozkład temperatury) oraz zapisanie jej jako siły masowej. Po zadaniu odpowiednich warunków brzegowych, można otrzymać rozkład naprężenia (rys. 5) w modelu według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego (HMH) oraz krzywą naprężenia w funkcji odkształceń (rys. 6).



Rys. 5. Rozkład naprężeń według hipotezy HMH w modelu kości

Fig. 5. HMH stress distribution in the model of bone

Wyniki analizy modelu kości potwierdzają słuszność przyjętych założeń oraz uproszczeń. Rozkład naprężenia w modelu kości (rys. 5), pozwala zaobserwować działanie modelu GTN. Maksymalne naprężenie nie pojawia się ani w miejscu obciążenia, ani zamocowania, tylko wewnątrz modelu. Świadczy to o uwzględnieniu zmiennej porowatości w przekroju modelu kości. Wykres naprężenia w funkcji odkształcenia (rys. 6) także można uznać za poprawny i zadowalający. Jest on zbliżony do przebiegu krzywych, które można spotkać w literaturze przedmiotu. Składa się on z części sprężystej i plastycznej. Otrzymane wyniki są bardzo obiecujące.



Rys. 9. Porównanie krzywych naprężenia w funkcji odkształcenia dla kości długiej: a) wynik analizy modelu kości (Ansys v. 11), b) wyniki w zależności od kierunku działania siły [17], c) przykład cyklicznego obciążania i odciążania kości korowej [20], d) ogólny przebieg krzywej naprężenia dla kości [21]

Fig. 9. Comparison the stress-strain curves for a long bone: a) result of the analysis for the model of bone (Ansys v. 11), b) the results depending on the direction of the force [17], c) multiple cycles of load and unloading cortical bone [20], d) a general stress-strain curve [21]

## 6. Wnioski

Z matematycznego punktu widzenia możliwe jest wykorzystanie równań termosprężystości, zamiast modelu ciała porowatego. Równanie termosprężystości oraz równanie konsolidacji przyjmują taką samą postać (5) i (16) dla materiału ortotropowego lub (11) i (18) dla materiału izotropowego. Są to równanie różniczkowe cząstkowe typu parabolicznego. Sprzężenia pomiędzy równaniem Terzagiego a równaniami sprężystości oraz równaniem Fouriera-Kirchhoffe'a i równaniami sprężystości także są identyczne (ta sama postać równań (14) i (20)). Analogia między równaniami termosprężystości, którymi dysponuje pakiet obliczeniowy Ansys v. 11, ułatwia określenie naprężenia w modelu mechanicznym kości. W klasycznym podejściu konieczne byłoby rozwiązanie równania Terzagiego, z którego obliczony rozkład ciśnienia  $p$  zostałby podstawiony do równań sprężystości, pozwalając wyznaczyć rozkład naprężeń. W naszym przypadku możemy wykorzystać sformułowanie termosprężystości, otrzymując rozkład naprężeń pochodzących od zmiany temperatury, która (z uwagi na analogię) będzie traktowana jako ciśnienie. Współczynnik przewodności termicznej  $\lambda_{ij}$  jest równoważny współczynnikowi konsolidacji  $c$  (zawierający m. in. współczynniki filtracji  $k_{ij}$ ),  $\rho c_v$  odpowiada ciężarowi właściwemu  $\gamma_w$ . Natomiast współczynnik rozszerzalności termicznej  $\alpha$  pseudowspółczynnikowi  $\hat{\alpha}$ .

Wyniki pracy potwierdzają, że do opisu struktury porowatej kości z powodzeniem można używać praw: Terzagiego i Darcyego (potocznie nazywanymi równaniami mechaniki gruntów). Ponadto możliwości użycia w obliczeniach analizy termosprężystej (z pakietu programu Ansys v. 11), skłoniły poszukiwań modelu i teorii zniszczenia oraz przebudowy kości. Zaproponowany model zniszczenia został oparty o model Gursona-Tvergaarda-Needelmana (także dostępny w pakiecie obliczeniowym Ansys v. 11).

Stworzony model obliczeniowy kości, oparty na równaniu Terzagiego oraz modelu numerycznym, dobrze rokuje jako model mechaniczny kości długiej, zważywszy na prostotę, łatwość zastosowania i dostępność modelu GTN w programie Ansys v. 11. Ewentualna dalsza praca nad jego rozwojem i kalibracją oraz wyniki porównane z rezultatami dostępnymi w literaturze przedmiotu pomogłyby poświadczyć o przydatności modelu w bioinżynierii.

## 7. Perspektywy dalszego rozwoju modelu

Model mechaniczny kości, oparty na równaniach mechaniki gruntów, został stworzony na podstawie określonych założeń upraszczających. Podobnie model numerycznym wykonany w pakiecie obliczeniowym Ansys v. 11, podlega pewnym przybliżeniom. W związku z tym należy skupić się przede wszystkim na zmniejszeniu różnic pomiędzy tworzonym modelem a rzeczywistą kością, co można uzyskać m. in. poprzez:

- stworzenie anizotropowego modelu kości (różne wartości modułów Younga i współczynników Poissona, w zależności od kierunków);
- rozpatrzenie przepływu anizotropowego, przejawiającego się różnymi współczynnikami filtracji w odpowiednich kierunkach:

$$k_{xx} \neq k_{yy} \neq k_{zz}$$

c) uwzględnienie zmiennych naprężenia w czasie:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial t} \neq \frac{\partial \sigma_2}{\partial t} \neq \frac{\partial \sigma_3}{\partial t}$$

d) rozwiązanie układu dwóch równań różniczkowych: równania sprężystości i równania konsolidacji z obciążeniem zmiennym w czasie:

$$\frac{E}{3(1-2\nu)} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial \tilde{A}}{\partial t} = -\gamma_w \frac{\partial p}{\partial t}$$

- e) dokładne określenie rozkładu ciśnienia panującego wewnątrz porów i na szkielecie;
- f) wykorzystanie modelu Gursona-Tvergaarda-Needelmana, pozwalającego w połączeniu z analizą pseudotermiczną oraz strukturalną na stworzenie modelu *remodelingu*;
- g) przeprowadzenie symulacji z innymi formami obciążeń (skręcanie, zginanie, cykliczna zmiana obciążeń) z wykorzystaniem modelu ewolucji uszkodzeń oraz porównanie z wynikami eksperymentalnymi;
- h) uwzględnienie efektu piezoelektrycznego w modelu przebudowy tkanki kostnej;
- i) zastosowanie zdjęć z tomografii komputerowej i uwzględnienie zmiany kształtu oraz przekroju kości przy tworzeniu geometrii.

## Literatura

- [1] *Anatomia prawidłowa człowieka*, pod red. Ziółkowskiego M., RU ZSP AM, Wrocław 1991, t. 1, 15-21, 54-63, 83-96.
- [2] *ANSYS ver.11 – Help Manual*, 2008.
- [3] B ę d z i ń s k i R., *Biomechanika inżynierska*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997, 7-53.
- [4] Bielski J., *Wprowadzenie do inżynierskich zastosowań MES*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2010, 7-56.
- [5] Bochenek A., Reicher M., *Anatomia człowieka*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 1999, t. 1, 189, 191.
- [6] Cowin S. C., *Bone poroelasticity*, Journal of Biomechanics, vol. 32, 1999, 217-238.
- [7] Detournay E., Cheng A.H.-D., *Fundamentals of poroelasticity*, Chapter 5 in *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects*, Vol. II, Analysis and Design Method, ed. C. Fairhurst, Pergamon Press, 1993, 113-171.
- [8] Doblare M., Garcia J.M., *Anisotropic bone remodelling model based on a continuum damage-repair theory*, Journal of Biomechanics, vol. 35, no. 1, 2002, 1-18.
- [9] Doblare M., Garcia J.M., Gomez M.J., *Modelling bone tissue fracture and healing: a review*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 71, 2004, 1809-1840.
- [10] G ł a z e r Z., *Mechanika gruntów*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1977, 11-12, 56-57, 69-77.

- [11] Kołaczkowski J., Kołaczkowski Z., *Anatomia funkcjonalna*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa–Poznań 1984, t. 1., 31-32, 40-43, 65-66, 73-74, 106-107, 119-121.
- [12] Lambe W.T., Whitman R.V., *Mechanika gruntów*, Arkady, Warszawa 1978, t. 2, cz. IV i V, 317-319, 344-346, 500-502.
- [13] Łaczek S., *Modelowanie i analiza konstrukcji w systemie MES Ansys v. 11*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011, 9-32.
- [14] Łydzba D., *Zastosowanie metody asymptotycznej homogenizacji w mechanice gruntów i skał*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002, 4-13, 90-95, 158-170.
- [15] Mazurkiewicz S., *Ocena właściwości mechanicznych kości*, [w:] *Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000*, pod red. Nałęcza M., Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa 2004, t. 5, 1-42.
- [16] Mrozowski J., Awrejcewicz J., *Podstawy biomechaniki*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2004, 1-3, 9-23, 47-50, 53-55.
- [17] Nordin M., Frankel V.H., *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System*, Philadelphia: Lea and Febiger, 1989, 54.
- [18] Skrzypek J., *Podstawy mechaniki uszkodzeń*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006, 61-67.
- [19] Szymański A., *Mechanika gruntów*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2007, 7-20, 86-98, 139-144.
- [20] Nyman J.S., Ling H., Dong X., Wang X., *Differences in the mechanical behavior of cortical bone between compression and tension when subjected to progressive loading*, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, vol. 2 (6), 2009, 613-619.
- [21] Wang X., *Cortical Bone Mechanics and Composition: Effects of Age and Gender*, Studies in Mechanobiology, Tissue Engineering and Biomaterials, vol. 5, 2013, 53-85.





BARTOSZ SZACHNIEWICZ\*

## KONCEPCJA DOBORU UNIWERSALNEGO ZESPOŁU PRĄDOTWÓRCZEGO WRAZ Z AGREGATEM CHŁODNICZNYM DO CIĘŻKICH LOKOMOTYW SPALINOWYCH

---

### CONCEPT SELECTION OF AN UNIVERSAL GENERATING SET WITH A REFRIGERATING UNIT FOR HEAVY DIESEL LOCOMOTIVES

---

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono propozycję uniwersalnego zespołu prądotwórczego – wraz z agregatem chłodniczym – przeznaczonego do zabudowy na ciężkich lokomotywach spalinowych. W trakcie opracowywania studium budowy przedmiotowego zespołu autor skupił się na lokomotywach serii SM31, SM48, S200 oraz SU45. Należy zaznaczyć, że zaproponowane rozwiązanie będzie mogło być wykorzystane podczas modernizacji lokomotyw innych serii oraz w trakcie budowy nowych pojazdów trakcyjnych. Na wstępie artykułu zawarto ogólną charakterystykę ww. lokomotyw manewrowych/pociągowych. Na podstawie przeprowadzonego bilansu mocy wskazano wartości mocy, jakimi dysponować powinny urządzenia wchodzące w skład przedmiotowego zespołu prądotwórczego. Następnie dokonano wyboru silnika spalinowego oraz zespołu prądnic. W ostatnim etapie podano wymagania dotyczące zespołu chłodniczego, określono jego podstawowe parametry oraz wymiary gabarytowe.

*Słowa kluczowe: zespół prądotwórczy, modernizacja lokomotyw, unifikacja*

#### Abstract

This paper presents an idea of a universal generating set with a refrigerating unit for heavy, modernized diesel – electric locomotives. During analysis the author focused on locomotives class SM31, TEM2, S200 and SU45. However, the proposed solution will be able to be used in modernization of locomotives other classes or construction of new vehicles. First of all, the paper presents general characteristics of locomotives class SM31, TEM2, S200 and SU45. In the next steps author shows results of the energy balance, indicates the diesel engine, main generator and auxiliary generator. In the end the author specifies the requirements for refrigeration unit, sets the parameters and dimensions.

*Keywords: generating set, modernization of locomotives, unification*

---

\* Mgr inż. Bartosz Szachniewicz, Instytut Pojazdów Szynowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

W ostatnich latach wzrosło zapotrzebowanie na nowe pojazdy trakcyjne, w tym przede wszystkim na spalinowe lokomotywy manewrowe/liniowe. Składa się na to wiele czynników – głównie konieczność minimalizacji kosztów eksploatacji posiadanego taboru oraz znaczny wzrost pracy przewozowej realizowanej przez przedsiębiorstwa transportu kolejowego. Pojazdy generujące wysokie koszty utrzymania zastępowane są więc nowymi konstrukcjami. Należy podkreślić, że zakup nowego taboru szynowego wiąże się ze znacznymi nakładami finansowymi – koszt zakupu lokomotywy manewrowej wynosi około 2 mln euro, a lokomotywy liniowej 4 – 5 mln euro. Konieczność minimalizacji kosztów produkcji i eksploatacji stała się główną przyczyną wprowadzenia uniwersalnych zespołów urządzeń/platform umożliwiających dowolną konfigurację oraz późniejszą modyfikację pojazdu szynowego (np. TRAXX – Bombardier, Vectron – Siemens, Gryffin – ZNLE, Gama – PESA). Modułowa budowa pozwoliła na znaczną unifikację pojazdów różnych serii poprzez np. wykorzystanie wspólnej ostoi do budowy pojazdów elektrycznych i spalinowych, zastosowanie uniwersalnych zespołów napędowych itd. Wpłynęło to na znaczne ograniczenie kosztów produkcji i eksploatacji nowobudowanych pojazdów szynowych.

Alternatywnym rozwiązaniem do budowy nowych pojazdów trakcyjnych jest modernizacja konstrukcji już istniejących. W zależności od zakresu prowadzonych prac koszty modernizacji lokomotywy nie przekraczają zazwyczaj 30–40% wartości nowego pojazdu trakcyjnego tego samego typu. Zdaniem autora w trakcie modernizacji różnych pojazdów trakcyjnych możliwa byłaby unifikacja wybranych zespołów/podzespołów. Rozwiązanie to niewątpliwie wpłynęłoby na uproszczenie prac modernizacyjnych oraz redukcję ich kosztów.

W niniejszym artykule zawarto studium techniczne budowy uniwersalnego zespołu prądowórczego wraz z agregatem chłodniczym. Przedmiotowy zespół – silnik spalinowy, prądnica główna, prądnica pomocnicza, agregat chłodniczy może być wykorzystany w trakcie modernizacji ciężkich lokomotyw manewrowych/liniowych eksploatowanych na terenie kraju i poza jego granicami. Analizy wykonano w oparciu o lokomotywy serii SM31, SM48, S200 oraz SU45, jednak omawiany zespół prądowórczy wraz z agregatem chłodniczym mógłby znaleźć zastosowanie podczas modernizacji innych pojazdów trakcyjnych lub w trakcie budowy nowych konstrukcji o porównywalnych parametrach.

## 2. Charakterystyka lokomotyw serii SM31, SM48, S200 oraz SU45

Studium techniczne budowy uniwersalnego zespołu prądowórczego wraz z agregatem chłodniczym wykonano w oparciu o lokomotywy serii SM31, SM48, S200 oraz SU45. Spośród wymienionych wyżej, pojazdy serii SM31 oraz S200 nie zostały poddane dotychczas żadnej modernizacji. Modernizacja lokomotywy serii SU45 nie obejmowała całego zespołu prądowórczego, a jej głównym celem było przystosowanie pojazdu do prowadzenia pociągów towarowych. Lokomotywa SM48/TEM2 była poddawana już różnym modernizacjom, a jedną z nich realizuje obecnie Newag Nowy Sącz. W jej trakcie pojazd poddawany jest gruntownej przebudowie. Poniżej zamieszczono ogólną charakterystykę wymienionych lokomotyw. Na rysunkach 1–4 przedstawiono omawiane lokomotywy, natomiast w tab. 1 zestawiono ich podstawowe parametry.

Lokomotywa serii SM31 jest pojazdem zaprojektowanym w kraju i produkowanym serijnie w latach 1976–1985 przez firmę „Fablok” w Chrzanowie w liczbie ponad 200 sztuk. Pojazd przeznaczony jest do realizacji ciężkich prac manewrowych na stacjach i górkach rozrządowych oraz prowadzenia ciężkich pociągów towarowych. Zespół prądotwórczy pojazdu zbudowano w oparciu o silnik spalinowy serii a8C22W oraz przekładnię elektryczną w układzie prąd stały–prąd stały. Ze względu na charakter wykonywanych prac lokomotywę SM31 wyposażono w jedną kabinę maszynisty, którą umieszczono w centralnej części ostoi pojazdu. Po obu stronach kabiny zabudowano przedziały maszynowe, w których umieszczono wszystkie niezbędne do pracy pojazdu urządzenia. Nadwozie oparto na dwóch wózkach o układzie osi C’o C’o.

Lokomotywa serii TEM2 (oznaczenie PKP SM48) to pojazd produkcji radzieckiej, którego konstrukcję oparto na rozwiązaniach wykorzystanych przy budowie amerykańskiej lokomotywy ALCO RSD – 1. Lokomotywa TEM2 produkowana była przez zakłady maszynowe w Birańsku i Ługańsku w latach 1967–1989 w liczbie ponad 3100 sztuk. Do Polski sprowadzono 430 sztuk tych lokomotyw, z czego 130 egzemplarzy skierowano do pracy w PKP, a 300 do kolei przemysłowych. Pojazd ten przeznaczony jest do wykonywania ciężkiej pracy manewrowej oraz prowadzenia ciężkich składów towarowych. Podobnie jak w lokomotywie serii SM31, zastosowano jedną, centralnie umieszczoną kabinę oraz dwa przedziały maszynowe. Podwozie pojazdu stanowią dwa wózki napędne w układzie osi C’o C’o. Zespół prądotwórczy lokomotywy zbudowano w oparciu o silnik spalinowy PD1 oraz przekładnię elektryczną w wariantcie prąd stały–prąd stały.



Rys. 1. Lokomotywa SM31

Fig. 1. Locomotive class SM31

Lokomotywa S200 to ciężki pojazd spalinowy produkcji czechosłowackiej produkowany przez zakłady CKD w Pradze w latach 1963–1991 w liczbie prawie 8000 sztuk. Znaczną większość tych lokomotyw (7455 egzemplarzy) wyeksportowano do dawnego Związku Radzieckiego. Lokomotywa serii S200 to pojazd sześćosiowy o układzie osi C’o C’o przeznaczony do wykonywania ciężkich prac manewrowych. Ze względu na charakter wykonywanej pracy w centralnej części pojazdu umieszczono jedną kabinę maszynisty, po obu stronach

której zlokalizowano przedziały maszynowe. Zespół prądowórczy stanowi wolnoobrotowy silnik spalinowy K6S310DR oraz zespół prądnic prądu stałego. Ogółem do Polski sprowadzono 143 sztuki lokomotyw serii S200, które zostały przeznaczone w całości do pracy na liniach przemysłowych.



Rys. 2. Lokomotywa TEM2/SM48

Fig. 2. Locomotive class TEM2/SM48



Rys. 3. Lokomotywa S200

Fig. 3. Locomotive class S200

Lokomotywa serii SU45 jest pojazdem polskim, którego produkcję realizowały zakłady Zakłady Metalowe im. Hipolita Cegielskiego w Poznaniu w latach 1970–1976. Ogółem wyprodukowano 270 pojazdów tego typu. Lokomotywy przeznaczone są głównie do prowadzenia pociągów pasażerskich, z tego względu wyposażono je w kocioł grzewczy służący do ogrzewania wagonów w okresie zimowym. Od końca lat 80 XX w. przestarzałą instalację grzewczą sukcesywnie zastępowano układem elektrycznego ogrzewania wagonów. Ze względu na charakter pracy nadwozie pojazdu ma dwie kabiny maszynisty, które umieszczono po obu stronach przedziału maszynowego. Zespół prądowórczy lokomotywy SU45 zbudowano w oparciu o produkowany na licencji firmy Fiat silnik spalinowy 2112SSF oraz przekładnię elektryczną typu prąd stały–prąd stały.



Rys. 4. Lokomotywa SU45

Fig. 4. Locomotive class SU45

Tabela 1

**Porównanie podstawowych parametrów lokomotyw SM31, SM48/TEM2, S200 oraz SU45**

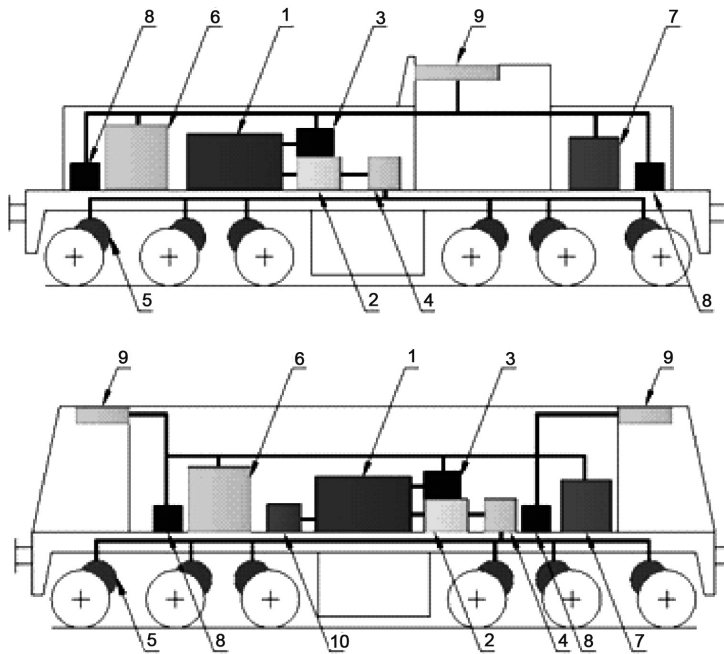
| Parametr                             | SM31               | SM48/TEM2          | S200               | SU45               |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Szerokość toru [mm]                  | 1435               | 1435/1520          | 1435/1520          | 1435               |
| Układ osi                            | $C'_0 C'_0$        | $C'_0 C'_0$        | $C'_0 C'_0$        | $C'_0 C'_0$        |
| Moc silnika spalinowego [kW]         | 880                | 880                | 993                | 1250               |
| Moc silnika trakcyjnego [kW]         | 173                | 212                | 123                | 173                |
| Rodzaj przekładni                    | DC – DC            | DC – DC            | DC – DC            | DC – DC            |
| Napęd urządzeń pomocniczych          | mechaniczny lub DC | mechaniczny lub DC | mechaniczny lub DC | mechaniczny lub DC |
| Nominalny nacisk zestawu na tor [kN] | 195                | 190,3              | 205                | 170                |
| Masa lokomotywy [t]                  | 116,4              | 116                | 123                | 102                |
| Prędkość maksymalna [km/h]           | 80                 | 100                | 95                 | 120]               |
| Najmniejszy promień łuku [m]         | 80                 | 80                 | 80                 | 80                 |
| System hamulca                       | Oerlikon           | Matrosow           | Matrosow           | Oerlikon           |

Analizy wyników i wskaźników dotychczasowej eksploatacji – zawarte w innych pracach – przemawiają za koniecznością modernizacji ww. pojazdów trakcyjnych. W trakcie modernizacji wymianie na nowe podlegać powinny przede wszystkim urządzenia wchodzące w skład zespołu prądowłórczego oraz agregat chłodniczy. W dalszej części artykułu przedstawiono metodykę doboru urządzeń wchodzących w skład uniwersalnego zespołu napędowego oraz agregatu chłodniczego.

### 3. Zespół prądowórczy wraz z agregatem chłodniczym

#### 3.1. Określenie minimalnej mocy urządzeń

Schemat ideowy zasilania urządzeń przez zespół prądowórczy dla lokomotyw serii SM31, TEM2, S200 oraz SU45, przedstawiono na rys. 5, natomiast w tab. 2 przedstawiono wyniki analizy bilansu mocy dla omawianych pojazdów. Minimalne moce podzespołów zestawionych w tab. przyjęto na podstawie niezależnej analizy bilansu mocy każdego z pojazdów. Analizę bilansu mocy wykonano w oparciu o znane parametry podstawowych urządzeń niezbędnych do właściwej pracy każdego pojazdu trakcyjnego. Obliczenia dla lokomotyw serii SU45 wykonano z uwzględnieniem zastosowania prądnicy grzewczej.



Rys. 5. Schemat zasilania urządzeń w lokomotywach serii SM31, SM48/TEM2, S200 (u góry) i SU45 (na dole): 1 – silnik spalinowy, 2 – prądnica główna, 3 – prądnica pomocnicza, 4 – prostownik, 5 – silnik trakcyjny, 6 – agregat chłodniczy, 7 – sprężarka powietrza, 8 – silnik wentylatora silników trakcyjnych

Fig. 5. The schematic diagram of devices feeding in locomotives class SM31, SM48/TEM2, S200 (top of the page) and SU45: 1 – diesel engine, 2 – main generator, 3 – auxiliary generator, 4 – rectifier, 5 – railway motor, 6 – refrigerating unit, 7 – compressor, 8 – electric engine of cooling fan of railway motor



**Moc urządzeń wchodzących w skład zespołu prądotwórczego lokomotyw serii SM31, TEM2, S200 oraz SU45**

| Parametr                      | SM31 | TEM2 | S200 | SU45 |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| Moc silnika spalinowego [kW]  | 1400 | 1500 | 1100 | 1700 |
| Moc prądnicy głównej [kW]     | 1250 | 1350 | 900  | 1250 |
| Moc prądnicy pomocniczej [kW] | 90   | 90   | 90   | 100  |

Na podstawie powyższych danych można stwierdzić, że lokomotywy serii SM31, SM48/TEM2, S200 oraz SU45 cechuje zbliżony przedział mocy. Możliwe jest więc dobranie urządzeń wchodzących w skład zespołu prądotwórczego w taki sposób, aby stanowiły one uniwersalny układ stosowany w każdym z omawianych pojazdów.

### 3.2. Wybór silnika spalinowego

Przy wyborze silnika spalinowego autor niniejszego opracowania uwzględnił następujące czynniki:

- moc znamionowa/znamionowa prędkość obrotowa – 1100–1700 kW/1800 obr/min,
- wymiary gabarytowe pozwalające na zabudowę silnika na ostoi z możliwością obniżenia wysokości przedziału maszynowego,
- zastosowanie nowoczesnych rozwiązań w konstrukcji zespołów i podzespołów silnika,
- spełnienie norm emisji spalin wg Dyrektywy EU,
- cenę i warunki zakupu wraz z kosztami utrzymania w eksploatacji,
- resurs naprawczy,
- doświadczenie producenta w zakresie stosowania tego typu silnika na lokomotywach spalinowych,
- obecność na polskim rynku sieci obsługi serwisowej oraz dostępu do części zamiennych,
- przeszkolenie personelu obsługowego użytkownika w zakresie wykonywania przeglądów oraz późniejszych napraw silnika w kraju.

Na podstawie wymienionych kryteriów przeprowadzono analizę dostępnych na rynku silników spalinowych. Spośród oferowanych konstrukcji do dalszych rozważań wybrano następujące silniki: firmy MTU – seria 12V 4000 R84 oraz Caterpillar – seria 3512C HD. Należy zaznaczyć, że pod uwagę brano jedynie seryjnie produkowane wersje wymienionych silników. Oba producenci wykazali się doświadczeniem w zakresie stosowania swoich produktów w pojazdach trakcyjnych. Silniki MTU 4000 R84 oraz CAT 3512C HD stanowią konstrukcje nowoczesne, wysokoobrotowe, o elektronicznej regulacji wtrysku. W tabeli 3 przedstawiono podstawowe dane techniczne ww. silników. Oba silniki dysponują zakresami mocy umożliwiającymi właściwe dopasowanie ich do zapotrzebowania pojazdów trakcyjnych ww. serii.

**Parametry silników CAT 3512C HD oraz MTU 12V 4000 R84**

| Parametr   | Silnik 3512C HD | Silnik 12V 4000 R84 |
|--|-----------------|---------------------|
| Moc nominalna [kW]                                       | 1100 – 1700     | do 1800             |
| Nominalna prędkość obrotowa [obr./min]                   | 1800            | 1800                |
| Liczba cylindrów   | 12              | 12                  |
| Średnica tłoka/skok tłoka [mm]                           | 170/215         | 170/210             |
| Objętość skokowa silnika [dm <sup>3</sup> ]              | 58,6            | 57,2                |
| Jednostkowe zużycie paliwa przy mocy znamionowej [g/kWh] | 212             | 207                 |
| Długość całkowita silnika [mm]                           | 2804            | 2670                |
| Szerokość całkowita silnika [mm]                         | 1630            | 1696                |
| Wysokość całkowita silnika [mm]                          | 2065            | 2001                |
| Masa silnika suchego [kg]                                | 6416            | 7600                |

W wyniku przeprowadzonej przedmiotowej analizy, autor przyjął do dalszych rozważań zastosowanie silnika Caterpillar 3512C HD. Producent silnika ma na terenie kraju sieć serwisów, co znacząco wpływa na skrócenie czasu potrzebnego na wykonanie czynności obsługowo-naprawczych.

### 3.3. Wybór zespołu prądnic

W niniejszym studium przy wyborze zespołu prądnic uwzględnione zostały następujące czynniki:

- prądnica główna – przedział mocy nominalnej/przy prędkości obrotowej 900–1350 kW/1800 obr./min,
- prądnica pomocnicza – moc minimalna 100 kW,
- maszyny typu kolejowego,
- wymiary gabarytowe i masa umożliwiające zabudowę urządzeń na ostoi pojazdu,
- nowoczesna i prosta konstrukcja,
- cena i warunki zakupu,
- koszty utrzymania,
- resurs naprawczy,
- doświadczenie producenta w zakresie stosowania tego typu podzespołów w taborze kolejowym,
- obecność na polskim rynku sieci obsługi serwisowej oraz dostęp do części zamiennych,
- umożliwienie obniżenia wysokości przedziału maszynowego.



Na podstawie powyższych czynników analizę dostępnych na rynku oraz stosowanych na pojazdach trakcyjnych zespołów prądnic autor proponuje zastosowanie prądnic synchronicznych, które wykonano w postaci dwóch odrębnych maszyn połączonych kołnierzowo we wspólnej osi ich wałów. Producentem proponowanego zespołu prądnic mogłby być przemysł krajowy (np. Emit Żychlin, wykorzystując dotychczasowe doświadczenia w produkcji prądnic trakcyjnych do modernizacji lokomotyw serii 6Dg, 15D i ST43). Moc znamionowa prądnicy głównej wynosić będzie około 1400 kW, a prądnicy pomocniczej 100 kW. Wykonany wg powyższego opisu zespół prądnic będą cechować stosunkowo niewielkie gabaryty. Pozwoli to na wygospodarowanie znacznej przestrzeni w przedziale maszynowym nad wspomnianymi maszynami elektrycznymi. Dzięki temu możliwe będzie zabudowanie układu wylotu spalin o parametrach zgodnych z wymaganiami producenta silnika spalinowego. Ponadto będzie istniała możliwość zabudowania dodatkowego układu oczyszczania spalin, dzięki któremu spełnione zostaną wymagania normy Stage IIIB.

### 3.4. Wybór agregatu chłodniczego

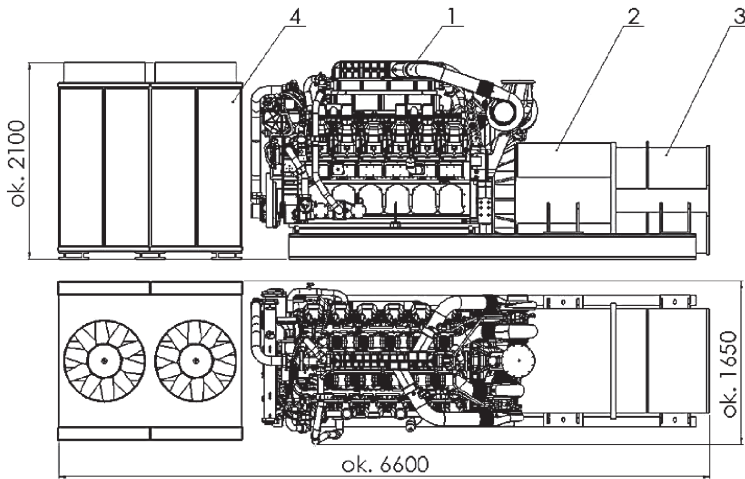
Przy opracowywaniu wstępnego projektu agregatu chłodniczego silnika 3512C HD przyjęto następujące wytyczne:

- zdolność rozproszenia ciepła generowanego przez obieg główny oraz obieg pomocniczy silnika spalinowego,
- wymiary gabarytowe i masa umożliwiające zabudowę układu na ostoi pojazdu,
- napęd wentylatora realizowany za pomocą silnika asynchronicznego,
- prosta konstrukcja,
- przystosowanie do pracy w pojazdach szynowych,
- umożliwienie obniżenia wysokości przedziału maszynowego (w przypadku lokomotyw manewrowych).

Na podstawie dostarczonego przez producenta bilansu cieplnego silnika 3512C HD – w różnych wariantach mocy/sterowania – zaproponowano rozwiązanie agregatu chłodniczego z radiatorami umieszczonymi w ścianach bocznych oraz dwoma niezależnie działającymi wentylatorami. Każdy wentylator napędzany będzie przez elektryczny silnik asynchroniczny zasilany napięciem  $3 \times 400$  V AC. Regulacją prędkości obrotowej wentylatora/ów w zależności od temperatury czynnika chłodzącego sterował będzie centralny sterownik pojazdu. Umożliwi to stosowanie agregatu chłodniczego na wszystkich z wymienionych wcześniej pojazdach bez wprowadzania w nim zmian konstrukcyjnych.

## 4. Podsumowanie

Przeprowadzony bilans mocy lokomotyw serii SM31, SM48, S200 i SU45 oraz wstępne analizy wymiarowe wskazują na możliwość zastosowania przedmiotowego zespołu prądotwórczego wraz z agregatem chłodniczym (rys. 6) w ww. pojazdach trakcyjnych.



Rys. 6. Widok agregatu prądowozowego 1 – silnik spalinowy CAT 3512C HD, 2 – prądnica główna, 3 – prądnica pomocnicza, 4 – agregat chłodniczy

Fig. 6. The view of diesel generator set 1 – diesel engine CAT 3512C HD, 2 – main generator, 3 – auxiliary generator, 4 – refrigerating unit

Dzięki zastosowaniu nowoczesnego silnika spalinowego, spełniającego wymogi dotyczące czystości spalin, znacznemu ograniczeniu ulegnie emisja szkodliwych substancji do otoczenia. Praktycznie całkowicie wyeliminowany zostanie problem drgań w kabinie maszynisty. W wyniku tego zdecydowanej poprawie ulegną warunki pracy obsługi. Ponadto zabudowanie nowoczesnego silnika spalinowego, nowoczesnych i bezobsługowych prądnic synchronicznych umożliwi tworzenie dynamicznych cykli utrzymania pojazdu. Efektem tego będzie zdecydowane poprawienie się współczynnika gotowości technicznej lokomotyw.

Zastosowanie na szeroką skalę zunifikowanego zespołu napędowo-chłodniczego wpłynie niewątpliwie na uproszczenie prac modernizacyjnych i obsługowo-naprawczych, przez co przyczyni się do obniżenia kosztów modernizacji oraz eksploatacji spalinowych lokomotyw manewrowych/liniowych.

## Literatura

- [1] Babeł M., *Warunki pracy, charakterystyka eksploatacyjna a niezawodność doładowanych trakcyjnych silników spalinowych*, Trakcja i Wagony 9/90, WKŁ, Warszawa 1990.
- [2] Dudziński W., Marciniak J., Wolfram T., *Wyniki badań niezawodności silnika spalinowego a8C22W. Metoda badań i wytyczne poprawy trwałości silników spalinowych a8C22W lokomotyw SM31*, COBiRTK, Warszawa 1987.
- [3] Kowalski S., Szewczyk W., *Lokomotywy 15D/16D – propozycja Newag S.A. Nowy Sącz na modernizację lokomotyw TEM2 – SM48*, t. 1 materiały XIX Konferencji Naukowej Pojazdy Szynowe, Targanice 15–17.09.2010.
- [4] Marciniak Z., *Dotychczasowe projekty modernizacji lokomotyw spalinowych w Polsce*, Technika Transportu Szynowego 9/2005, SITK, Łódź 2005.

ANNA SZEWCZYK\*

## AUTENTYZM REWITALIZACJI PRZEZ ZABAWĘ

### AUTHENTICITY OF ENTERTAINMENT REVITALIZATION

#### Streszczenie

W artykule przedstawiona została metoda oceny autentyczności architektury parków zabawy na terenach rewitalizowanych. Wprowadzono definicję autentyczności zaczerpniętą z ekonomii doznań oraz wyróżniono park narracji jako najbardziej autentyczną formę spośród analizowanych przestrzeni. Na wybranych przykładach wskazano na potencjał tematyki inspirowanej dziedzictwem kulturowym oraz scenograficzności terenów przemysłowych. Określono podstawowe zasady doboru podmiotu rewitalizacji oraz sposoby jego adaptacji do potrzeb budowy parku zabawy, który ma szansę stać się przestrzenią o wysokich walorach architektonicznych i ekonomicznych.

*Słowa kluczowe: architektura, rewitalizacja, autentyzm, zabawa, ekonomia doznań, park narracyjny*

#### Abstract

The paper presents a method assessing the authenticity of architecture of fun parks in revitalized areas. A definition of authenticity, based on experience economy, is introduced and the narration park is distinguished as the most authentic from among the analyzed spaces. Based on selected examples, the potential of thematisation inspired by cultural heritage and the scenographic values of brownfields is indicated. The basic rules for the selection of an object of revitalization and the manner of its adaptation for the purpose of building a fun park, which is likely to become a space with high architectural and economic values have been indicated.

*Keywords: architecture, revitalization, authenticity, entertainment, experience economy, narration park*

\* Mgr inż. arch. Anna Szewczyk, studia doktoranckie, Wydział Architektury, Politechnika Krakowska.

## 1. Nowe ruiny

Nowe ruiny<sup>1</sup>, których powstanie jest efektem odejścia od przemysłowego procesu produkcji, zajmują ogromne obszary. Wciąż poszukujemy możliwości ich innowacyjnego zagospodarowania w duchu zrównoważonego rozwoju. Szczególnie istotne jest to w miejscach, w których przemysł przez lata obniżał atrakcyjność przestrzeni, degradując środowisko naturalne i kulturowe. Miejsca opuszczone potrzebują wizji, która wykreuje ich sens na nowo i zapobiegnie trwałemu wyłączeniu z użytkowania.

Kreacja staje się podstawą działania w przestrzeni, która musi przededefiniować sens niejednokrotnie wielkich, powierzchniowo obszarów. Tylko odpowiednio przyjęty scenariusz, zaprojektowany na miarę lokalnych możliwości i zasobów, daje szansę na osiągnięcie trwałego sukcesu. Poszukiwane są rozwiązania całościowe, które wypełniają sensem rozległe obszary, dając szansę na nowy etap rozwoju.

Opuszczone miejsca inspirują nie tylko architektów; coraz częściej dostrzegana jest potrzeba wyobrażenia sobie znanego miejsca na nowo. Jedną z istotnych barier na drodze do przekształceń jest powszechne przekonanie o braku wystarczających środków i sił pozwalających na zmianę. Ciągłe nie doceniany jest potencjał zasobów które pozostają do dyspozycji, tj. obszarów poprzemysłowych i ludzkiej kreatywności.

## 2. Przemiany

Wraz ze zmianami gospodarczymi nastąpiły zmiany społeczne. Według teorii społeczeństwa doznań<sup>2</sup> Schulza, obecne dążenie do przeżywania przyjemności charakteryzuje ogół społeczeństwa, a „pragnienia doznań (...) definiują sens życia”. Odbiorcy doznań ciągle eksponują się na wrażenia i bodźce, które mają zapewnić odczucie komfortu i szczęścia. Ciągła potrzeba nowej stymulacji powoduje wzrost znaczenia estetyki nad celowością. Społeczeństwo, wytwarzając coraz to nowsze formy zabawy, by zająć swój wolny czas, upodabnia się do wizji przedstawionej w Nowym Babilonie Constanta. *Homines Ludentes* – dawcy i biorecy doznań – potrzebują ciągle nowych bodźców i możliwości samorealizacji. W odpowiedzi na te potrzeby powstają kolejne przestrzenie zabaw, przeżyć i doświadczeń.

Najważniejszą cechą charakterystyczną zabawy, jest jej odrębność i ograniczoność [1]. Ta jej własność ma największe znaczenie w odniesieniu do fizycznej przestrzeni. Co więcej, „chętnie otacza się tajemnicą i (...) nie obowiązują (w jej sferze) prawa i obyczaje pospolitego życia” [1]. Uczestnik tej gry, chce być oszukiwany i łudzić się, że to co dzieje się na jego oczach, rozgrywa się naprawdę. Idealna rozrywka całkowicie pochłania bawiącego się, tak iż zapomina o codzienności i popada w rozpasanie lub zachwyty. Zachwyty można uznać za idealne doznania, dające poczucie spełnienia.

Jednym ze sposobów realizacji idealnej przestrzeni przeżyć jest formuła tematykacji, pozwalająca na tworzenie iluzji świata, różniącego się diametralnie od codzienności. Jednym

<sup>1</sup> Ruiny są tutaj rozumiane jako obiekty opuszczone, których dalsze użytkowanie jest nieopłacalne.

<sup>2</sup> *Die Erlebnisgesellschaft* (teoria doznań) sformułowana została przez Gerharda Schulza, co przybliżyła Sieradzki [7] tłumacząc, iż doznanie w ujęciu autora to doznanie pochodzące z zewnątrz, które zostaje indywidualnie przetworzone, 33.

z ważniejszych czynników, wpływających na sukces przedsięwzięcia tematycznego jest odpowiednie dobranie tematu do potrzeb odwiedzających oraz budowa przekonującej scenografii.

### 3. Tematyzowana rozrywka

Park tematyczny to przestrzeń zaprojektowana do pełnienia roli atrakcji turystycznej. Obszar skonstruowany w formie enklawy, utopijnego świata, którego scenografia odpowiada przyjętej opowieści. Lorens [3] definiuje proces nadawania tematu (tematyzację) jako „świadome i intencjonalne nadawanie danej przestrzeni form architektonicznych nawiązujących do czasów minionych lub innych kręgów cywilizacyjnych (...)”. Innymi popularnymi tematami są: wizje przyszłości, baśniowe i filmowe historie. Codziennością tematyzacji jest łączenie realnego z nierealnym, symulacja rzeczywistości, która nie istnieje. Charakterystyczną cechą atrakcji tematycznych jest skupienie się na jednym wybranym zagadnieniu. W dobrze zaprojektowanym parku kolejne atrakcje przyciągają wizualnymi znakami w przestrzeni, których rozmieszczenie wywołuje pożądany ruch odwiedzających, jednocześnie budując fabułę przygodowej opowieści<sup>3</sup>. Niewielkie parki tematyczne o zasięgu lokalnym wykorzystują głównie tematy bazujące na regionalnych wątkach kulturowych [5], większe parki wykorzystują uniwersalne historie, pojemniejsze treściowo. Jeżeli posługują się kilkoma opowieściami, zapewniają ich przestrzenną suwerenność.

Nowy, skonstruowany świat integruje elementy natury i kultury tylko, gdy służą one wybranemu wątkowi. W większości przypadków założenia tematyczne są niezależne od otoczenia, intencjonalnie zakładane w miejscach ustronnych, gdyż elementy rzeczywistości są z zasady sprzeczne z przyjętą fabułą. To uniezależnienie od kontekstu i zapotrzebowanie na przestrzeń skłania do zakładania ich na terenach pojmowanych jako nieatrakcyjne dla innych form zabudowy<sup>4</sup>.

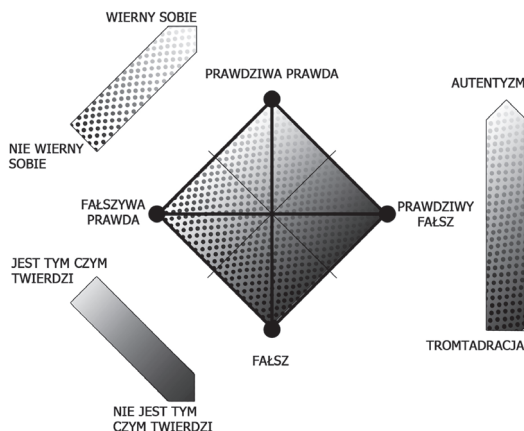
### 4. Problem autentyczności, ekonomia doznań

Tematyzowana rozrywka, przez swój konsumpcyjny i komercyjny charakter, stała się produktem na globalnym rynku doznań. Architektura ją określająca nosi to samo piętno. Mimo że pozycja tematyzacji we współczesnym świecie jest nie zachwiana, podlega ciągłym przeobrażeniom. Coraz częściej podnoszona jest kwestia autentyczności. Kuryłowicz [2] twierdzi, że „prawdziwe przeżycia odbiorcy – nie wrażenia estetyczne czy artystyczne, a właśnie przeżycia – może wywoływać architektura, która jest prawdziwa i autentyczna”. Jednak w społeczeństwie spektaklu i doznań, w miejscach gdzie odbiorcy oczekują niesamowitości i zmiany, wszystko jest ambiwalentne – autentyczne i nieautentyczne zarazem. Transformacji ulega samo pojęcie „autentyczny” to już nie „prawdziwy”, rzeczywisty, ale „wierny sobie i będący tym, czym twierdzi, że jest”.

<sup>3</sup> Projektowanie komunikacji, która przyczynia się do budowania opowieści, jest jednym z dziesięciu „przykazań” projektowania parków, które sformułował Martin Sklar (wieloletni *imagineer* parków Disney’a) na AAM Annual meeting w 1987 r.

<sup>4</sup> Np. Walt Disney World Resort rozlokował się na pierwotnie bagnistych terenach Florydy.

Na taką zmianę definicji wskazuje m.in. Pine [9]. Znaczenie wierności deklaracji w powiązaniu z faktyczną strukturą ma kluczowe znaczenie dla oceny stopnia autentyczności produktu. Najwyższą jakość zapewnia **prawdziwa prawda**, która jest wierna sobie (prawdziwa) i będąca tym czym deklaruje (prawda). Autentyzm w tym ujęciu nie łączy się z pięknem, a z prawdziwością formy i jej przekazu<sup>5</sup>. Mniejszy stopień autentyzmu, posługując się terminologią ekonomii doznań<sup>6</sup>, ma **prawdziwy fałsz** – jest tym czym nie jest – „nie jest tym czym twierdzi (fałsz) ale jest wierny sobie (prawdziwy) i **fałszywa prawda** – **nie jest tym czym jest** – jest tym czym twierdzi (prawda) ale nie jest wierna sobie” (fałszywa). Najniżej w hierarchii autentyzmu stoi **fałsz**, który „nie jest tym czym twierdzi, że jest i nie jest wierny sobie” (rys. 1).



Rys. 1. Zależność autentyzmu (tromtadracja – autentyzm) od wierności sobie (nie wierny sobie – wierny sobie) i deklaracji wobec innych (jest tym czym twierdzi – nie jest tym czym twierdzi) (oprac. własne na podstawie [6])

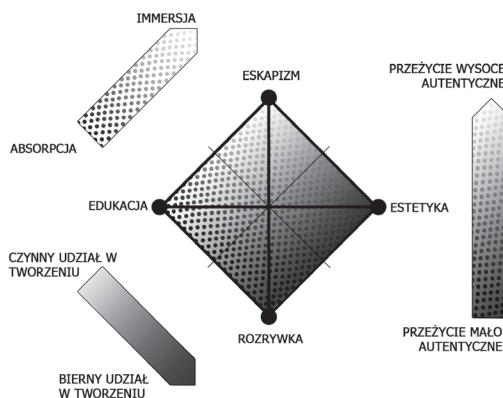
Fig. 1. Dependence of authenticity (showiness vs authenticity) on trueness to self (not true to itself vs true to itself) and a declaration towards others (is what it says to be – is not what it says to be) (drawn by author based on [6])

Zgodnie z ekonomią przeżyć „każde doznanie jest w pewnym stopniu autentyczne” [6], ale większy stopień autentyzmu wywołuje bardziej prawdziwe wrażenie (rys. 2). Prawdziwa prawda daje eskapistyczne przeżycie sprawiając, że widz jest współtwórcą (czynny udział w tworzeniu) spektaklu z ekscytacją (immersja). Przekładając to na model zabawy – powoduje całkowite oddanie się grze oraz jej współtworzenie. Częściowo autentyczne odczucia daje edukacja i estetyka. Doświadczenie edukacyjne żąda czynnego udziału odbiorcy (w budowaniu sceny), ale nie wymaga zaangażowania emocjonalnego (absorpcja). Doznanie estetyczne używa istniejącej przestrzeni lub wydarzenia (w procesie tworzenia lub zmiany widz biernie uczestniczy) do kreowania uniesień (immersja). Za mało autentyczną przyjmuje się

<sup>5</sup> Można zauważyć analogię do kaczki i dekorowanej budy Venturiego. Oba pojęcia mogą być interpretowane jako kreacja stopnia autentyzmu. W tym ujęciu kaczka – twierdzi, że jest czym nie jest, dekorowana buda – twierdzi że nie jest czym jest.

<sup>6</sup> Pojęcie ekonomia doznań (*experience economy*) zostało wprowadzone w 1998 r. przez B.J. Pine’a II i J.H. Gilmore’a, jest to kolejny etap rozwoju gospodarki (po rolnej, przemysłowej i usługowej).

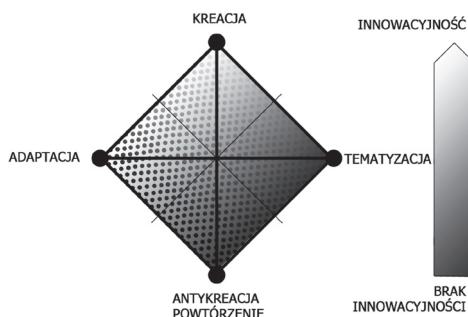
rozrywkę, która ani nie wywołuje trwałego emocjonalnego poruszenia (absorpcja), ani nie wymaga czynnego udziału w tworzeniu.



Rys. 2. Zależność autentyczności przeżycia od wymaganego zaangażowania emocjonalnego (immersja – absorpcja) i udziału w tworzeniu doświadczenia (czynny udział w tworzeniu – bierny udział w tworzeniu) (oprac. własne na podstawie [6])

Fig. 2. Dependence of experience authenticity on emotional engagement (immersion vs absorption) and participation in the creation of an experience (active participation vs passive participation) (drawn by author, based on [6])

W odniesieniu do sposobu kształtowania współczesnej architektury tematyżacja operuje głównie estetycznymi doznaniem, które mają za zadanie uformować przestrzeń w taki sposób, by była tym czym nie jest. Adaptacja, służąca przede wszystkim edukacji, to intencjonalne zatarciem wybranych cech, by nie być tym czym jest (rys. 3). Jedynie kreacja może doprowadzić do stworzenia autentycznej i innowacyjnej przestrzeni, która w pełni zaangażuje użytkownika do jej czynnego współtworzenia czyli użytkowania, ulepszania – partycypacji w jej rozwoju. Powtórzenie (antykreację) cechuje brak innowacyjności tj. stosowanie zapożyczeń bez uwzględnienia lokalnego kontekstu.



Rys. 3. Cztery rodzaje działań projektowych i ich innowacyjność – powtórzenie < tematyżacja, adaptacja < kreacja (oprac. własne)

Fig. 3. Four types of design activities and their innovativeness – repetition < thematisation, adaptation < creation (drawn by author)



Intencjonalny dobór formy autentyzmu wywołuje spodziewane doznania odbiorców, tworzy klimat projektowanego spektaklu. Tematyzacja, jak twierdzi Lorens, jest „drogą na skróty” [3] używaną tam, gdzie współczesna architektura nie jest w stanie dorównać popularnemu wyobrażeniu prawdy. Przestrzeń stematyzowana jest porównywalna stopniem innowacyjności z zaadaptowaną (zastosowanie sprawdzonych wzorców przy uwzględnieniu lokalnych warunków).

## 5. Formy przestrzeni zabawy, przestrzenie narracji

Wracając do form przestrzeni zabawy, należy zauważyć, iż ich model ewoluuje wraz ze zmianami społecznymi i gospodarczymi. Pierwotnym wzorcem są objazdowe wesołe miasteczka, które z czasem przekształciły się w stałe parki rozrywki. Parki tematyczne wykorzystują formułę skansenu (parku kulturowego) i połączyły ją z przestrzenią animowaną. Warto zwrócić uwagę, że każda z tych form organizacji istnieje do dzisiaj. W nowszych realizacjach można dostrzec zmodernizowane elementy poprzednich układów. W czasach masowej produkcji iluzji i komercjalizacji piękna, wyzwają się odruchy sprzeciwu. Powstaje grupa odbiorców poszukujących elementów autentyzmu, nawet w rozrywce. Trend ten się wzmacnia. Nową odpowiedzią w dziedzinie zabawy są parki narracji.

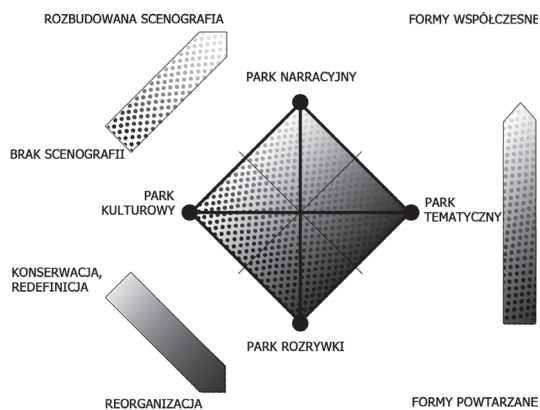
Przez pojęcie narracji rozumie się pogłębioną tematyzację, czyli taką, która opiera się o autentyczne wartości związane z historią miejsca i jego kulturą. Zaaranżowana przestrzeń narracji wykorzystuje na równi z atrakcyjnymi, elementy uznawane powszechnie za nieatrakcyjne, kreując nieznaną parkom tematycznym kontrasty. Już Lynch [4] zauważył, że miejsca zaniedbane stają się *landmarkami* – charakterystycznymi punktami orientacyjnymi wyróżniającymi się z uporządkowanego tła. Miejsca poprzemysłowe w wyidealizowanym świecie zabawy nie miały dotąd reprezentacji, co stanowi ich wciąż niedoceniany potencjał.

## 6. Rewitalizacja na cele zabawy, przykłady

Rewitalizacje obszarów, których przemysłowa przeszłość została uznana za wysoki kapitał początkowy, budujący temat zabawy, wciąż są nieliczne.

Park zabawy na terenach *brownfields* może przybrać formę parku rozrywki gdzie dziedzictwo przemysłowe jest przeorganizowywane, a scenograficzność przestrzeni pomijana, jego wyposażenie stanowią formy powtarzalne – wykorzystywane również na terenach *greenfields*. Park kulturowy i park tematyczny są realizacjami bardziej rozwiniętymi architektonicznie. W pierwszym z nich dziedzictwo jest świadomie konserwowane, powtórnie definiowana jest jego funkcja, a rola scenografii jest ograniczana. W drugim rozbudowywana jest scenografia, a spuścizna poprzemysłowa przeorganizowywana. Park narracyjny łączy pożytkowanie historycznej spuścizny z dodaną, inspirowaną nią scenografią (rys. 4).

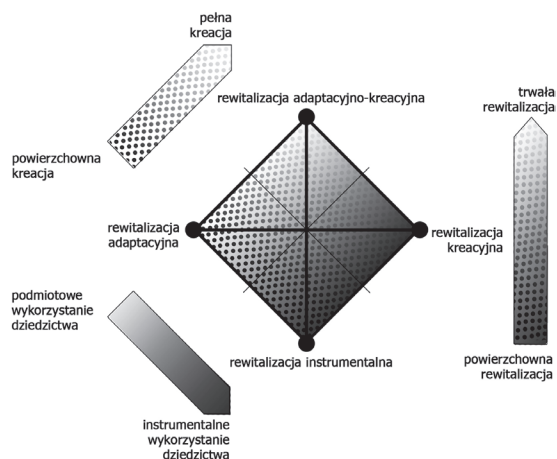




Rys. 4. Zależność typów parków zabawy na terenach rewitalizowanych od wykorzystania obiektów historycznych (konservacja i redefinicja – reorganizacja) oraz roli scenografii inspirowanej dziedzictwem (brak scenografii – rozbudowana scenografia) w odniesieniu do ich innowacyjności (formy powtarzane– formy współczesne) (oprac. własne)

Fig. 4. Dependence of types of fun parks located in brownfields on use of historical objects (preservation and redefinition vs reorganization) and role of scenography inspired by heritage (lack of scenography vs advanced scenography) referencing to innovation (repeated forms vs modern forms)

Park narracji łączy adaptację – podmiotowe wykorzystanie dziedzictwa, które stanowi jego podstawę, z pełną kreacją wzbogacającą przekaz i ofertę zabawy dając szansę trwałej rewitalizacji. Park kulturowy podmiotowo traktuje dziedzictwo i minimalizuje znaczenie kreacji. Park tematyczny przedkłada kreację nad dziedzictwo. Park rozrywki instrumentalnie traktuje dziedzictwo i ogranicza kreację na rzecz powtarzalnych elementów wyposażenia (rys. 5).



Rys. 5. Określenie sposobów rewitalizacji w zależności od sposobu wykorzystania dziedzictwa i elementów nowo wprowadzanych

Fig. 5. Indicating manners of revitalization depending on the manner of using heritage and newly introduced elements

Znakomity przykład udanych przedsięwzięć rewitalizacyjnych i najwyższej jakości architektury dają Magna Science Adventure Centre autorstwa Wilkinson Eyre Architects w Rotherham i Eden Project w Bodelva projektu Grimshaw Architects<sup>7</sup>. Oba kompleksy wykorzystują w pełni poprzemysłowe dziedzictwo do budowy scenografii i tematu turystycznej atrakcji (Eden – kopalnię odkrywkową kaolinu, Magna – hutę stali). Pochodząca z historii oprawa nowoczesnych form tworzy niepowtarzalną przestrzeń z ogromną ilością detali, których zbudowanie, jeśli dzisiaj w ogóle możliwe, wiązałoby się z ogromnymi kosztami. Realność każdego szczegółu buduje aurę niesamowitego świata parku narracji. Forma parku pozwala korzystać z przestrzeni w całości, wchodzić z nią w relacje.

Narracyjne otoczenie jest sprzyjającym środowiskiem nie tylko dla eskapizmu, rozrywki, doznań estetycznych, ale i edukacji, co zostało wykorzystane w obu wspomnianych przypadkach – Magna funkcjonuje jako centrum nauki (*science*), Eden Project jako centrum edukacji ekologicznej. Połączenie edukacji i rozrywki (*edutainment*) skłania do autentycznego zaangażowania. Kornwalijski ośrodek prowadzi szereg programów socjalnych<sup>8</sup>, wiele z nich opiera się o ekonomię społeczną i wolontariuszy.

Park narracji jest przykładem działania rewitalizacyjnego, które przez innowacyjne połączenie współczesnej architektonicznej kreacji i dziedzictwa tworzy scenografię fantastycznego świata, oczarowującego odbiorcę, który poruszony autentycznym doznaniem staje się jej aktorem i aktywnie ją przekształca (rys. 1–5). Można też postrzegać go jako dzieło *site-specific*, który powstanie zawdzięcza inspiracji miejscem, nie dopasowaniem zamierzenia do kontekstu. Adaptacje połączone z kreacją wykorzystują jako scenerię obszary niechciane, przetwarzają je i uwypuklają ich cechy, wpływając na zmianę oceny ich wartości.

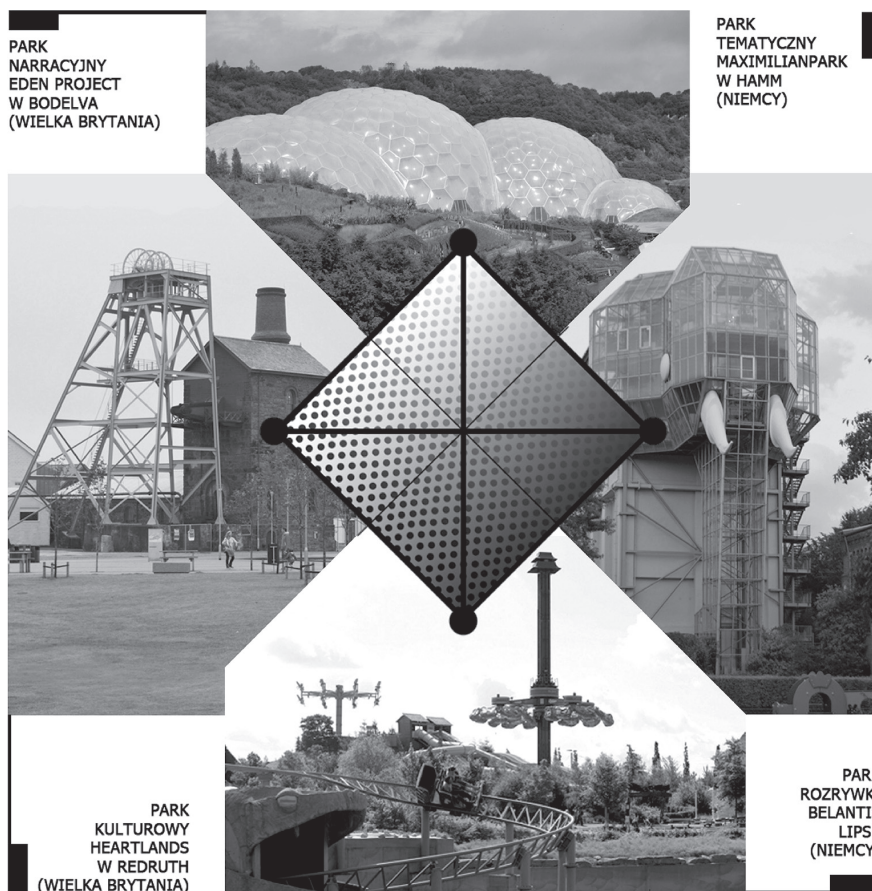
Przykładami o mniejszym (choć nie zawsze) zasięgu oddziaływania turystycznego, społecznego i o mniejszym autentyzmie doznań są parki tematyczne i kulturowe, jednakże ich rola jako przestrzeni wspólnych (i publicznych) jest trudna do przecenienia. Podobnie ma się sprawa z jakością i autentyzmem architektonicznego środowiska, które zależą od lokalnych uwarunkowań. Posługując się uproszczeniem można stwierdzić, że struktury tematyzowane cechuje przerost form i treści w celu osiągnięcia wiarygodności przekazu, kulturowe – minimalizm celujący w ukazanie czysto historycznej formy (rys. 6).

Rewitalizacja służąca przekształceniu obszaru na park rozrywki ma w pełni komercyjny charakter, co przynosi głównie ekonomiczne i polityczne zyski (wartość nieruchomości sąsiednich wzrasta, w przypadku lokowania poza miastami, nie następuje proces gentryfikacji). Nie można traktować ich jako przestrzeni publicznych, ponieważ dostęp do nich jest kontrolowany i płatny. Sztuczność ich formy pozwala zakładać, że z czasem będą traciły na znaczeniu i wzbogacą swą ofertę o elementy zaczerpnięte z bardziej zaawansowanych form. Należy docenić ich znaczenie jako inwestycji, które wspomagają proces zagospodarowania nieużytków i popierać ich lokalizację na terenach zdegradowanych.

Charakterystyczną cechą parków zabawy jest ich ciągły rozwój i zmiany, które jak wizji wspomnianego Constanta, powodują pęczkowanie struktury. Omawiane przedsięwzięcia nie są wyjątkiem – wystarczy wspomnieć, że Eden Project planuje budowę kolejnego (trzeciego) biomu, Magna – następny obszar zabawy na świeżym powietrzu.

<sup>7</sup> M.in. Magna otrzymała *Royal Institute of British Architects Stirling Prize 2001*, Eden Project był do niej nominowany.

<sup>8</sup> Np. przeciwdziałających wykluczeniu, propagujących ekologiczny styl życia – zasięg projektów jest coraz większy, bywa, że globalny (np. Green Futures) [8].



Rys. 6. Cztery przykłady rewitalizacji przez zabawę w układzie odniesienia autentyczności i innowacji (oprac. własne<sup>9</sup>)

Fig. 6. Four examples of entertainment revitalization in the authenticity and innovation system (drawn by author)

## 7. Wnioski

W przedsięwzięciach rewitalizacyjnych możemy zauważyć wszystkie wymienione stadia autentyczności i fałszu. Każde z nich ożywia przestrzeń i, zgodnie ze wspomnianą ekonomią doznań, odpowiada na realne zapotrzebowanie, gdyż w społeczeństwie przeżyć, każda forma zabawy znajduje amatorów. Nie pochwalając takiego instrumentu rewitalizacji, zauważa się, że nawet realizacje będące architektonicznym kiczem powodują ożywienie obszaru. Przestrzenie poprzemysłowych ruin mogą stanowić wysoki kapitał początkowy, pozwalający się wykorzystywać jako pożądana scenografia o zadanym temacie, dająca impuls do zmian

<sup>9</sup> Fotografia Belantis Park <http://www.flickr.com/photos/belantis/4415981431/sizes/l/in/set-72157623637154674/>, pozostałe fotografie z archiwum autorki.

przynoszących pozytywne rozwiązania przestrzenne, ekonomiczne i społeczne. Duża wartość scenograficzna przestrzeni wykorzystana jako kontekst realizacji związanej z zabawą, przyczynia się do wzrostu autentyczności jej architektonicznego wyrazu. Parkami zabawy nie powinny stawać się największe, najpiękniejsze obiekty, ale te, które przed katastrofą (odejściem od przemysłowego procesu produkcji) nie wyróżniały się szczególnymi wartościami architektonicznymi. To one są najbardziej podatne na adaptację i kreację.

Jak wspomniano, przestrzenie rozrywki nie muszą, a nawet nie powinny być eksponowane w przestrzeni, by nie tworzyć powszechnej iluzji. Jediną pożądaną cechą jest ich łątwą dostępność, przy uwzględnieniu różnych środków komunikacji. Przestrzenie przemysłowe zazwyczaj posiadają niezbędną infrastrukturę, której wymagał proces produkcji. Mitrasinović [5] zwraca uwagę, iż parki rozrywki, w początkach XX wieku zaczęto lokować poza miastem, na krańcach linii tramwajowych, po to, by poprawić ich rentowność podczas weekendów, co i dzisiaj mogłoby zostać wykorzystane w celu reaktywacji lokalnych linii kolejowych, modernizacji infrastruktury drogowej. Zagospodarowanie na atrakcje turystyczne może pomóc odnaleźć sens i kierunek zmian ośrodkom, które po przemianach nie mają wizji dalszego rozwoju. Śmiały i autentyczny (opierający się na historii miejsca i pozostający z nią w zgodzie) scenariusz rozwoju pozwala na wykreowanie wartościowej przestrzeni zabawy. By tak się stało, działanie powinno wzbudzić społeczne zaangażowanie, które da impuls do tego, żeby ruiny zamienić w świadków nowego rozdziału historii.

#### Literatura

- [1] Huizinga J., *Homo Ludens, zabawa jako źródło kultury*, tł. Kurecka M. i Wirpsza Czytelnik, Warszawa 1985, 310.
- [2] Kuryłowicz E., *Piękno w autentyzmie czy autentyzm piękna?*, Czasopismo Techniczne, 6-A/2007, 92-97.
- [3] Lorens P., *Tematyzacja przestrzeni publicznej miasta*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2006, 216.
- [4] Lynch K., *Obraz miasta*, tł. Jeleński T., Archivolta, Kraków 2011, 236.
- [5] Mitrašinović M., *Total landscape, theme parks, public space*, Ashgate, Aldershot 2006.
- [6] Pine B.J., Gilmore J.H., *Welcome to the Experience Economy*, Harvard Business Review, 98407, July-August 1998, 97-105.
- [7] Sieradzki P., *Gerharda Schulze teoria społeczeństwa doznań*, Wydawnictwo Adam Marszałek, Toruń 2011, 220.
- [8] Smit T., *Eden the whole inspiring story of the Eden Project*, Eden Project Books, London 2011, 336.
- [9] Pine J., *What consumers want*, ([http://www.ted.com/talks/joseph\\_pine\\_on\\_what\\_consumers\\_want.html](http://www.ted.com/talks/joseph_pine_on_what_consumers_want.html) – dostęp 28.09.12).

WOJCIECH ŚWIĄTEK\*

## TRZY POLSKIE PAWILONY NA WYSTAWY ŚWIATOWE EXPO – TRZY STOPNIE JAKOŚCI

---

### THREE POLISH PAVILIONS FOR WORLD EXPO – THREE LEVELS OF QUALITY

---

#### Streszczenie

Wystawa Światowa Expo to okoliczność i szansa na swobodną promocję całokształtu osiągnięć narodu, propagowania wiedzy o jego dziedzictwie, dorobku w zakresie nauki, techniki i kultury. Wystawa jest także odzwierciedleniem zmian i progresu kraju. Wreszcie Expo to architektura mająca w sposób lapidarny i zachęcający przekazać tę wiedzę, stając się podstawowym językiem komunikacji skłaniającym do interakcji. Każdy z ostatnich trzech polskich pawilonów nawiązuje ten dialog, posługując się właściwymi sobie i odpowiednimi dla sytuacji formułami. Jakość obiektów wystawowych stopniowana jest na równi przez pryzmat funkcji i formy, jak i promowania z jednej strony wartości kulturowych i tożsamościowych, z drugiej innowacyjnej technologii.

*Słowa kluczowe: Expo, pawilon, architektura, technika, wystawa*

#### Abstract

The World Expo is an exhibition of circumstance and opportunity for the unconstrained promotion of all the achievements of the nation, popularizing knowledge of its heritage, achievements in science, technology and culture. The exhibition is also a reflection of the changes and progress of the country. Last but not least it is architecture which is to deliver knowledge in a concise and inviting manner, thus becoming the primary language of communication. Each of the last three Polish pavilions establishes this dialogue, by using the relevant and appropriate formulas. The quality of the objects is graded equally from the perspective of form and function as well as promotion the cultural values and identity along with innovative technologies.

*Keywords: Expo, pavilion, architecture, technology, exhibition*

---

\* Mgr inż. arch. Wojciech Świątek, Instytut Projektowania Urbanistycznego, Wydział Architektury, Politechnika Krakowska.

## 1. Wystawy światowe Expo i uczestnictwo w nich Polski

Od 1851 roku – czyli daty pierwszej Wielkiej Wystawy w Londynie (Great Exhibition) mającej w pełni międzynarodowy charakter, Expo stało się sceną dla wyrażenia indywidualnej wartości poszczególnych krajów, zrozumiałym w pojęciu międzynarodowym, przekazem. Rywalizacja ta, pozbawiona brutalności wojen i porywających emocji sportowych wydarzeń, stała się jedną z ważniejszych okazji, o charakterze globalnym, do wyniesienia własnej – „narodowej” indywidualności ponad inne. Cywilizowana forma współzawodnictwa przyniosła współczesności wiele istotnych odkryć na polu architektury i sztuki, ale także osiągnięć konstrukcyjno-technologicznych. Wskazywała kierunki rozwoju, nieraz pozostawiając po sobie trwałe obiekty (rys. 1) – pomniki wpisujące się na stałe w pejzaż miast, stające się ich symbolem.

Polska pierwszą okazję do zaprezentowania się miała w 1933 r. w Chicago. Był to skromny początek uczestnictwa w Wystawach Światowych. Cztery lata później w stolicy Francji sytuacja przedstawiała się zgoła inaczej – laury za całokształt zbierali polscy artyści, a architektura pawilonu narodowego wyróżniona została jako jeden z trzech najdoskonalszych obiektów wystawy<sup>1</sup>. Głównym projektantem był (późniejszy profesor Politechniki Warszawskiej) Stanisław Brukalski (wspólnie z Bohdanem Lachertem, Bohdanem Pniewskim i Józefem Szanajcą).



Rys. 1. Expo 1958 r., Bruksela. Atomium – jeden z kilku symboli Expo pozostawiony do czasów współczesnych, arch. A. Waterkeyn

Fig. 1. World Expo 1958, Brussels. Atomium – one of several Expo symbols left to the present day, designed by A. Waterkeyn

Po II wojnie światowej, przez prawie pół wieku Polska nie brała udziału w wystawach. Pierwszą okazją do przestawienia po przerwie była Wystawa w Sewilli (1992 r.), ale podobnie jak w następnych – w Taejon (1993 r.) i w Lizbonie (1998 r.), był to ledwo zauważalny przejaw obecności naszego kraju w międzynarodowym towarzystwie.

<sup>1</sup> O historii bytności Polski na wystawach Expo szerzej opisuje M. Jeleńska [2].

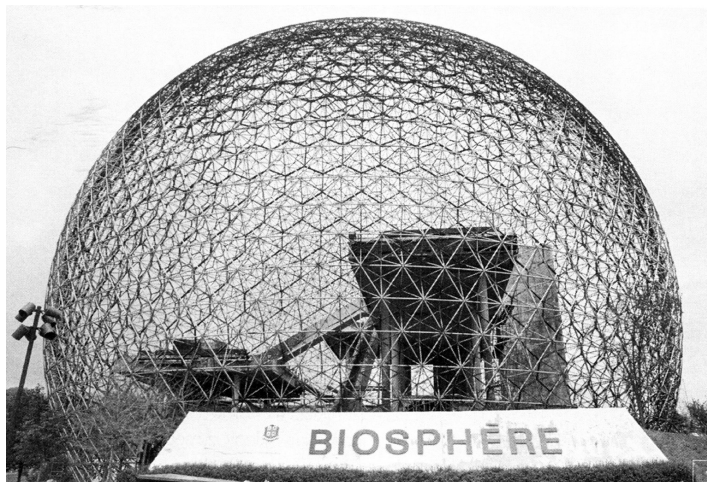


Zasadniczym przełomem okazała się światowa wystawa w Hanowerze w 2000 r., gdzie pawilon polski projektu Wojciecha Obtulowicza zdobył duże uznanie odwiedzających. Dzieło Krzysztofa Ingardena było bardzo udaną kontynuacją dobrej passy, potwierdzoną pozytywnymi ocenami polityków i organizatorów wystawy. Zakładając tendencję rosnącą, ostatnia Wystawa Światowa była wyzwaniem dla projektantów nowego pawilonu. Wyzwanie to nie zdeprimowało architektów, pozwalając osiągnąć imponujący efekt i stworzyć wyróżniający się obiekt. We wszystkich trzech przypadkach zastosowana technologia w realizacji obiektów była istotną składową sukcesu.

## 2. Język symboliki

Jednym z podstawowych celów, jakie stawiają sobie projektanci pawilonów narodowych, jest trafne zdefiniowanie skojarzeń przypisanych danemu krajowi i wyrażenie ich w zwięzły, czytelny sposób. W poprzednich dziesięcioleciach, szczególnie przed II wojną światową, forma wyrazu była rozwinięciem ówczesnych tendencji w budownictwie, lub jednoznacznym przełożeniem narodowej (ludowej) tradycji na język architektury. Awangarda torowała sobie drogę w czasach rewolucji myśli, płomiennej fascynacji nowoczesnością, realizując się w ideach konstruktywizmu, futuryzmu czy ekspresjonizmu. Modernizm ewoluował, stał się wizerunkiem współczesności. Kolejne dziesięciolecie z powodu ogólnoświatowego regresu gospodarczego i nasilenia się totalitaryzmu charakteryzowało się powrotem form monumentalnych i klasycznych, jak również tradycyjnej technologii.

Pawilony Expo w czasach powojennych odzwierciedlały aktualne trendy architektury, choć pojawiały się pionierskie konstrukcje, jak pawilon firmy Philips Le Corbusiera (Bruksela 1958 r.), amerykańska kopuła geodezyjna Richarda Buckminster Fullera (Montreal 1967 r. – rys. 2) czy namiotowa konstrukcja Otto Frei'a i Rolfa Gutbroada (pawilon Niemiec Zachodnich – Montreal 1967 r.).



Rys. 2. Expo 1967 r., Montreal. Kopuła geodezyjna, arch. Richard Buckminster Fuller

Fig. 2. World Expo 1967, Montreal. Geodesic dome, designed by Richard Buckminster Fuller

Ogólna skłonność do wyścigu o największe, najwyższe, a przede wszystkim najnowocześniejsze technologicznie, cechuje obiekty wystawowe państw chcących się liczyć w skali świata w tym okresie.

Wraz z dewaluacją uprzednio nienaruszalnych zasad, która przypadła na lata 80., braku wykształcenia się nowego – czystego stylu i zwrotu architektury w kierunku wszystkich dziedzin życia i wreszcie samego człowieka, formy wystawiane na Expo zyskały na różnorodności. Nastąpiło przejście od emanacji potęgi do działań promocyjnych, kreowania pożądanego wizerunku państwa i zapewniania o potencjale w dyscyplinach rozwojowych dla cywilizacji.

Wystawa Światowa Expo w Hanowerze w 2000 r. obfitowała w formy silnie zdefiniowane, zauważalna była tendencja do ekspresji kultury przez techniczne możliwości. Pojawiły się tam pawilony o formie monumentalnej (np. pawilon niemiecki) ale również biomorficznej (np. *pączkujący kwiat* – pawilon węgierski, papierowa struktura będąca propozycją Japonii).

Pawilon polski zarówno w kwestii użytych materiałów, jak i samej formy nie był ekstrawagancki. Potężne, krzyżujące się stalowe belki, wsparte solidnymi pylonami przypominały inżynierskie konstrukcje mostów. Relacje przestrzenne elementów konstrukcyjnych w połączeniu z prowadzeniem komunikacji w budynku i jego otoczeniu dały wrażenie przebywania w punkcie węzłowym, na skrzyżowaniu. Całość była symbolicznym pomostem między wschodem i zachodem, północą i południem – przecięciem szlaków, odnosząc się do geopolitycznej roli Polski w Europie<sup>2</sup>.

Wybitnym następcą hanowerskiego, był pawilon zaprojektowany przez Krzysztofa Ingardena dla Światowej Wystawy w Aichi. Zgodnie z założeniami każdy z wystawców miał do zaaranżowania określoną przez stalowy szkielet przestrzeń i swobodę w kształtowaniu jego elewacji. Autorzy zdecydowali się na użycie wikliny w postaci modularnych paneli. Płynna linia złocistej powłoki przywodzi na myśl skojarzenia z wydrami na brzegu polskiego morza, faliste, płynące jak muzyka linie uwypuklają kształt fortepianu – dając szanse na skojarzenie najbardziej skuteczne z racji miejsca wystawy.

Wyjątkowo dobrym wyczuciem wykazali się twórcy najnowszego pawilonu na Expo w Szanghaju. Siła przekazu całości bryły jest ogromna, skala nie mąci odczucia papierowej lekkości właściwej dla dalekowschodniego odpowiednika polskiego „origami”. Użycie motywu ludowej wycinanki nawiązuje swoim gęstym ornamentem do chińskiego liternictwa. Na pierwszy rzut oka wydaje się przeplatany tą kaligrafią, po chwili odkrywa się prawidłowość wzoru zadziwiającego powtórnie. Obiekt jest całkowicie zdominowany głównym motywem, co potęguje wrażenie jego nadrealności.

Na przestrzeni dziesięcioleci przekaz informacji przez formę architektoniczną zmienił się od prezentacji „rekordowych” osiągnięć inżynierskich, na rzecz architektoniczno-designerskich hybryd, wspartych najnowocześniejszymi osiągnięciami technologicznymi. Symbolika obiektów jest bardziej czytelna i bliższa powszechnemu stereotypowi lub ikonie o globalnym zasięgu. Z drugiej strony abstrakcja w umiejętnej oprawie może wynieść przedmiot do poziomu międzynarodowego „logo”, co świetnie udało się w przypadku pawilonu brytyjskiego na ostatnim Expo.

Sposób odczytywania przedmiotu, jeśli nie zdeterminowany w ogóle, bardzo mocno zależy od kręgu kulturowego w jakim kształtuje się świadomość potencjalnego odbiorcy.

<sup>2</sup> Wrażenia po rozstrzygnięciu konkursu architektonicznego na pawilon polski na Expo 2000 opisuje Stiasny G. [6].



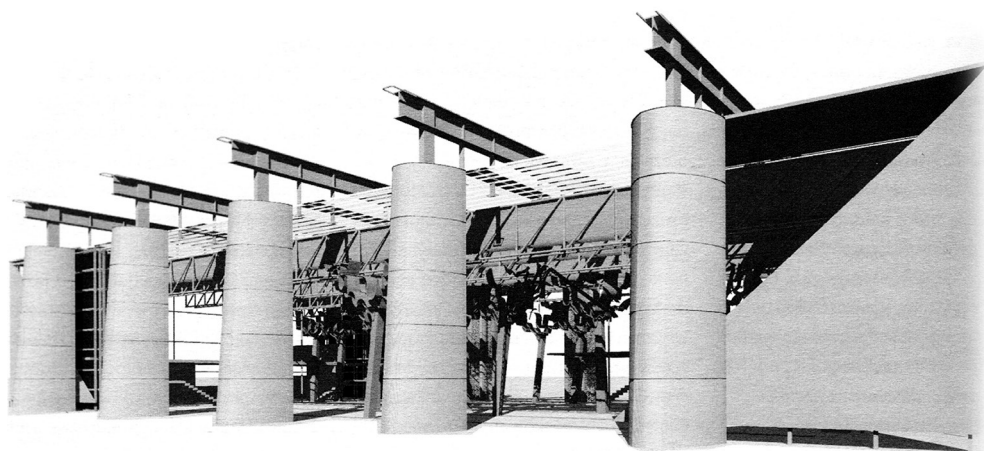
Historia ostatnich wystaw każe przypuszczać, że język porozumienia pomiędzy dziełem a człowiekiem należy uzależnić od miejsca, w którym pawilon jest prezentowany – znaczną większość odwiedzających stanowią gospodarze wydarzenia. Odpowiednie wydaje się podejście w sposób zdefiniowany, jednoznaczny formalnie do pawilonu hanowerskiego, tak jak logiczne jest założenie używania bardziej metaforycznych przedstawień w obiektach na Wystawach Światowych w Aichi i Szanghaju.

Narody pobudzające swoją wyobraźnię od najmłodszych lat, w sposób odmienny od naszego, europejskiego – między innymi przez naukę tak podstawowej umiejętności jak czytanie i pisanie, będą statystycznie bardziej wyczulone na abstrakcyjny przekaz we właściwej stylistyce. Pismo obrazkowe dalekiego wschodu składające się z piktogramów, ideogramów i złożów o dużym stopniu skomplikowania, jako uczona umiejętność, pobudza intuicję poszukiwacza znaczeń w sposób naturalny. Ten sposób komunikacji mnoży liczbę konotacji, wpływa na odmienny tok skojarzeń i zestawień.

### 3. Komunikacja z odbiorcą

Wystawa Expo jako wydarzenie jest komunikatem oddziałującym globalnie. Większość ludności świata nie będzie miała okazji zobaczyć architektury wystawowej w rzeczywistości. Tej zbiorowości informacji dostarcza prezentacja multimedialna podobna do telewizyjnej reklamy, rządzącej się tymi samymi prawami. Kluczem do sukcesu jest wywarcie najlepszego wrażenia na widzu, spowodowanie zachwytu, pochlebnych opinii. Z tego punktu widzenia najnowszy pawilon narodowy jest obiektem najbardziej efektywnym, fotogenicznym, komercyjnie najsukuczniejszym. Przekaz poddany właściwej obróbce uwydatnia walor produktu, obraz i dźwięk go wyostrowa, zagęszczając zestaw doznań i emocji. Twórcy polskich pawilonów – co widoczne jest po efektach ich działań – uwzględnili miejsce odbywania się wystawy, specyficzne upodobania estetyczne potencjalnych odbiorców, jak i współczesność będącą czynnikiem wyznaczającym projektowe trendy.

Pierwszy z opisywanych obiektów miał formę uporządkowaną, solidną i otwartą, co wpisuje się w ogólny pogląd o niemieckiej technice i rzemiośle. Zgodne jest prawdopodobnie z tym, jak chciałby określać siebie i swój kraj statystyczny Niemiec i jak jest on widziany na zewnątrz. Wojciech Obtulowicz z zespołem stworzył architekturę, która w pełni żyje w porze dziennej. Przewiewne wnętrza obiektu, przezroczyste przegrody (również dach), zachęcająca zieleń – jest spójnym komunikatem, zaproszeniem do przestrzeni relaksującej, zdrowej, przyjaznej i jasnej. Ze wszystkich trzech pawilonów ten jako jedyny swoim wnętrzem wychodził na zewnątrz. Zieleń która wypełniała transparentny prostopadłościan widoczna była z każdej strony. Była elementem odwołującym się do pierwotnych instynktów i odruchów człowieka – będąc schronieniem, miejscem wytchnienia. W zderzeniu z techniczną stroną samego budynku ukazanie zgodnej koegzystencji przyrody i człowieka wywoływało chęć przebywania w takim mikroklimacie. Bardzo istotną różnicą pomiędzy pawilonem hanowerskim i jego następcami jest kwestia wejścia do obiektu. Najważniejsze w tym przypadku są ruchome ściany które umożliwiają przemierzanie obiektu w sposób intuicyjny i swobodny, czyniąc go dostępnym od obu dłuższych boków. Autorzy dzieła nazwali pawilon mostem światła [6], co ma odniesienie do kształtowania architektury obiektu w związku z bezpośrednim sąsiedztwem, komunikacją i rolą światła dla całości założenia.



Rys. 3. Expo 2000, Hanower. Zwycięska koncepcja konkursowa, arch. Obtułowicz W., Kępski Ł., Lachowicz G., Pięta A., Dyga J., współpraca: Rupar K., Geroch P. i stud. Małgorzata Mondalska

Fig. 3. World Expo 2000 in Hannover. Winning concept of the architecture competition, designed by Obtułowicz W. and Kępski Ł., Lachowicz G., Pięta A., Dyga J., cooperation: Rupar K., Geroch P., stud. Mondalska M.

Obiekt zaproponowany na wystawę w 2000 roku jest ewolucją wcześniejszego projektu pracowni – sceny letniej Teatru Ludowego zaproponowanego do zlokalizowania na Rynku Głównym w Krakowie. Zaprojektowana forma pozwala przechwycić znaczną część spacerujących traktami, daje szansę na przypadkowe odwiedziny. Wejście nie jest sztywno zdefiniowane – nie ma potrzeby nakierowywania na nie, ani szukania go.

Pawilon Krzysztofa Ingardena emanuje prostotą, jego syntetyczna, całościowa architektura ujmuje poetyką i trafnością łączącą formę z symboliką i tematyką samej wystawy. Komunikat ten był jednoznaczny dla japońskich architektów, spotkał się również z bardzo ciepłym przyjęciem przez odwiedzających go gości. Polski pawilon z Aichi ma cechę którą, przyciąga widza, raczej niezależnie od pory doby – nocą jest ona tylko wyraźniej podkreślona przez światło – tą cechą jest przyjemna miękkość architektury (rys. 4). Projektantom udało się osiągnąć efekt dynamizmu, dramatyzmu i wspomnianej miękkości i łagodności jednocześnie. Powodzenie zapewniła prawdopodobnie decyzja zasadnicza dla całości projektu, czyli zastosowanie paneli wiklinowych stanowiących powłokę o wyraźnej fakturze i strukturze, przezroczystości i przewiewności. Oglądane w skali całości obiektu powielają swoje indywidualne własności, stając się jednorodną powłoką. Tutaj, w przeciwieństwie do pawilonu z Szanghaju, zasadniczym źródłem magnetyzmu jest swoiste poczucie bezpieczeństwa i ciepła generowane przez płaszczyznę budowli. Z racji swojej zwartej, obłej formy i jednorodnego poszycia ma wyraźnie zaznaczone – cieniowane wklęsłości i wypukłości. Część bocznej elewacji podkreślona wyraźną zmianą koloru i faktury w oczywisty sposób określa miejsce wejścia w budynek. Przestrzeń ta jest stosunkowo duża powierzchniowo, po zmroku wyartykułowana przez iluminację i światłocień. Podcień ze stalowej konstrukcji w połączeniu z ciągnącym się szklanym zadaszaniem chodnika nie pozwala błędzić w poszukiwaniu celu. Już na początku tej ścieżki zostaje się wciągniętym w przygodę w bajkowej krainie [4], dostając obietnicę interesujących przeżyć i doświadczeń.



Rys. 4. Expo 2005, Aichi. Elewacja z paneli wiklinowych pawilonu polskiego. Projekt pawilonu architektki Ingarden K. i Ewy J. oraz artysta plastyk Janicki A., współpraca architektki: Urbanowicz P., Hojda P., Haduch B., Machaj S., Starzycki D., Smogulecki G., Chuchacz P., Bury B., Chowaniec R.

Fig. 4. World Expo in Aichi. Wicker panel facade of the Polish pavilion. Architects: Ingarden K. and Ewy J., artist Janicki A., cooperation with architects: Urbanowicz P., Hojda P., Haduch B., Machaj S., Starzycki D., Smogulecki G., Chuchacz P., Bury B., Chowaniec R.

Pawilon pracowni WWAA (rys. 5) operuje bardzo zdecydowanymi, ostrymi motywami formalnymi w porównaniu z poprzednikami. Wprawdzie jedna z zasadniczych zalet koncepcji konkursowej, czyli logiczny ciąg zwiedzania i korzystania z obiektu od przyziemia, płynnie, do poziomu dachu, została po drodze utracona – nie przeszkodziło to w pozostawieniu agresywnego trójkątnego wcięcia w bryle znaczącego wejście (będącego początkiem tej ścieżki). Pomijając brak tej funkcjonalno-formalnej konsekwencji, samo wejście bardzo dobrze zaznacza się w tektonice bryły. Odrywający się od ziemi narożnik, w naturalny sposób uwalnia przyziemie, dając głęboki cień z mieniącymi się różnokolorowym światłem, atrakcjami za głównym wejściem. Miejsce wejścia i jego charakter jest trafnie wykreowane.

Pawilon polski z Szanghaju spełnia pokładane w nim oczekiwania w sposób spójny z językiem komunikacji naszych czasów, skutecznie zaznaczając się w pamięci wizytujących Expo. Niemal jednoznaczne dla Chińczyków było nawiązanie do ich tradycyjnych lampionów – dodatkowo podkreślone nocnymi iluminacjami, celny okazał się również motyw mazowieckiej wycinanki rozlewający się po całej kubaturze, upodabniający się do pisma kraju środka. Elewacja którą nocną porą budują przede wszystkim setki skomplikowanych, mieniących się kolorami wzorów, przykuwa uwagę, mówi (krzyczy?) do przechodniów. Przez jednostkę czasu jaką stanowi chwila kontaktu wzrokowego z przedmiotem, obiekt nie jest bierny – na poligonie, jakim jest teren wystawy, trwa nieustająca walka o uwagę. Sposobem porozumiewania się są powtarzające się sygnały – nasycone i krótkotrwałe, zdecydowanie wyrażające zachętę i dosięgające kolejnych – następujących po sobie odbiorców.

Umiejętność przechwycenia zainteresowanych zwiedzających to połowa sukcesu. Chcąc trwale zapamiętać się w umyśle gościa i pozostawić dobre wrażenie potrzebna jest kontynuacja ciągu atrakcji na równie wysokim poziomie.



Rys. 5. Expo 2010 w Szanghaju. Pawilon polski projektu pracowni WWA – architekci: Paszkowska N., Mostafa M. i Kakowski W.

Fig. 5. World Expo 2010, Shanghai. Polish pavilion designed by WWA – architects Paszkowska N., Mostafa M. and Kakowski W.

Wrażenia odwiedzających pawilon hanowerski były mieszane z lekkim wskazaniem na pozytywne. Niestety przeciągnięcie oceny na stronę pochlebnej zawdzięczaliśmy głównie uwijającemu się zespołowi hostess i hostów, jak i cieplej, rodzinnej atmosferze – trochę mniej architekturze wnętrza, a najmniej scenariuszowi ekspozycji.

Główna aranżacja, na którą składały się imponujący przeszklony dach z niemal podpierającymi go drzewami, przemierzające otwarte wnętrza świeże powietrze dawały świetną bazę, korespondującą z hasłem przewodnim targów *Człowiek – przyroda – technika*. Niestety wewnętrzna sceneria usiłowała wyperswadować widzowi jakiegokolwiek powiązania ze strukturą, na której eksplorację udał się gość. „Zgrzebny naród w kurnych chatkach” – tymi słowami najczęściej posługiwała się krytyka – nie udało się sprzedać nastroju pewnej umowności, niedosłowności i bajkowości. Drewniane, tęgie chaty jawiły się w oczach odwiedzających jako typowy i gęsto występujący przykład zabudowy polskiej prowincji. Podobnie mało zachęcające były prezentacje multimedialne, które wraz z zestawem atrakcji przemawiały głównie do najmłodszych odbiorców, nie dając szansy by dobra architektura polskiego pawilonu dała się zapamiętać.

Sposób autoprezentacji pawilonu z wystawy w Aichi jest zasadniczo różny od poprzednika, wnętrze jest skutecznie skrywane za złocistą, wiklinową powłoką. Scenografia określona jest w sposób zdecydowanie bardziej syntetyczny i lapidarny. Podłużny przekrój budowli jest nawiązaniem do ukształtowania terenu Polski – od morza po góry. Tak określona idea dała możliwość bardzo czytelnego zaprezentowania atrakcji i symboli kraju, stanowiąc jednocześnie doskonałą przestrzeń wielu prezentacji multimedialnych i występów. Wśród opinii zwiedzających świetna architektura odbierana z zewnątrz w sposób nie pomniejszający zachwyty kontynuowana była w środku obiektu, nie dając podstaw krytyce na porównania ekspozycji wewnętrznej z hanowską sielanką [7].

Pawilon wystawowy na Expo w Szanghaju powtórzył błąd naiwności z Expo w Hanowerze. Podstawa jaką jest przełożenie charakterystycznej wycinanki na grę światła i cienia było zamierzeniem przewodnim autorów projektu. Niestety merytoryczno-formalna część



prezentacji i wyposażenia, uznawana była za banalną, a jej oddziaływanie na Chińczyków trudne do przewidzenia (rys. 6). Szczególnie drażniące jest fakt całkowitego rozejścia się formy pawilonu jako ekscytującej i współczesnej z banalną prezentacją audiowizualną.



Rys. 6. Expo 2010, Szanghaj. Wnętrze polskiego pawilonu

Fig. 6. World Expo 2010, Shanghai. Polish pavilion interior

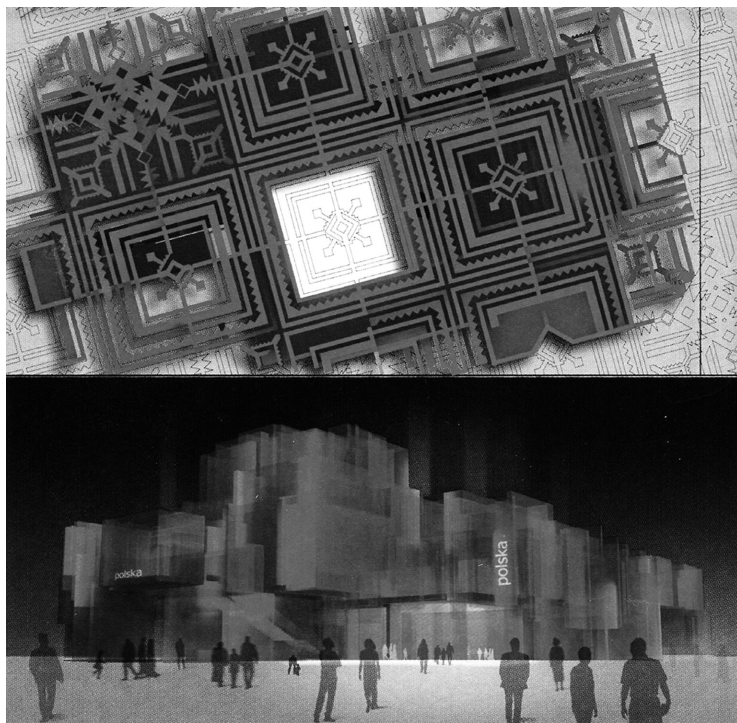
W ujęciu wnętrz – spośród trzech obiektów, silne jest wrażenie, że pierwszy obiekt ma cechy mieszczące się w skojarzeniu z pojęciem „pawilon”. Jest w nim przede wszystkim dużo atrakcji doraźnych (lub te właśnie zostały uznane przez odwiedzających za kluczowe) – kiosków, stoisk i straganów, gdzie pozyskuje się pewien zakres informacji i wychodzi. Pawilon na wystawę w Aichi, przez całościowy formalnie motyw przewodni, odczytywany z miejsca, bardziej zasługuje na miano „ekspozycji”. Elementy budujące wnętrze wydają się być pasujące do siebie potwierdzając tę łączność. Do poziomu pawilonu z Japonii miał szansę dorównać ostatni z nich, ale interesujące wnętrza pogrążone zostały przez treść obrazującą irracjonalny wizerunek naszego kraju.

#### 4. Koncentracja środków przekazu

Rola pawilonu wystawowego pełniącego funkcję obiektu promocji i informacji o kraju, związana jest bezpośrednio z kwestią komunikacji z odbiorcą. Przekaz rozpoczyna się od kontaktu wzrokowego, konsekwentnie zagęszczając, wzbogacając i urozmaicając się w miarę poznawania obiektu. Logicznym i oczekiwanym przez odbiorcę scenariuszem jest dozowanie wrażeń, w sposób zapewniający co najmniej rozrywkę. Lepiej, gdy uczestnik spektaklu jest zaskakiwany jakością i podaniem treści, a niekonwencjonalność i różnorodność „opowieści” oddziałuje na wiele zmysłów, dawkując emocje podobnie do tego, jak czynią to wydarzenia sportowe czy interesujący film. Aby podobna prawidłowość miała miejsce, niezbędne jest podtrzymanie dobrego pierwszego wrażenia poprzez kontynuację fabuły wewnątrz obiektu. Pawilony z Hanoweru i Szanghaju zostały okaleczone przez koncepcję przedstawienia kraju. Niezaprzeczalne zalety obu, napełniające widza nadzieją i zaostrzające apetyt na więcej, zostały przesłonięte banałem lub (jak to miało miejsce w Chinach) niedopasowaniem i niespójnością merytorycznej strony widowiska. Obronną ręką z tak postawionego zadania

wyszedł jedynie pawilon Ingardena, który dzięki płynności i malowniczości architektury – zarówno z zewnątrz, jak w środku – przeprowadzał odwiedzającego przez całą opowieść bez nieuzasadnionych elementów. Relacja najważniejszych kształtujących całość czynników miała wspólny mianownik.

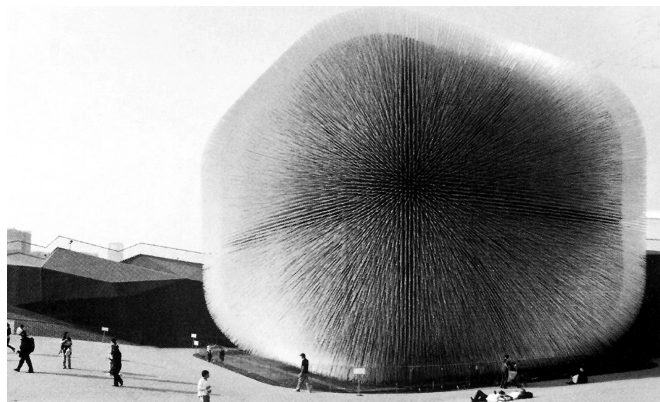
Niektóre obiekty wystawowe na Expo zaprojektowane były w sposób umożliwiający bardzo prawdopodobną identyfikację ich proveniencji (np. Rosja na Expo 2010). Większość tę informację przekazywała dopiero za pomocą multimedialnych przedstawień. Polskie pawilony należały do tej grupy. Tym ważniejsza wydaje się umiejętność skoncentrowania informacji na zasadzie kraju w pigułce – tak by nie znudzić, a zainteresować, umocnić markę państwa, które stało się obiektem zainteresowania. Najbardziej skoncentrowane i najbardziej dosłownie przemawiające są prezentacje wewnątrz obiektów. Próby zareklamowania Polski jako miejsca, gdzie zachowała się przede wszystkim drewniana architektura lub dopasowywanie kraju o odmienną narodową psychę i kulturowość do wizytujących gospodarzy było błędem. Kontynuacja gry skojarzeń, która mogła poprawić ogólny odbiór po wejściu do wewnątrz wystąpiła jedynie w sensie formalnym i czytelnie w ostatnim polskim pawilonie. Motyw który mógł stanowić swoistą „nić Ariadny” miał szanse również zaistnieć w nagrodzonym drugim miejscu projekcie na pawilon w Szanghaju (projektu K. Ingarden, J. Ewy – rys. 7).



Rys. 7. Expo 2010, Szanghaj. Projekt konkursowy nagrodzony II miejscem, arch. K. Ingardeni J. Ewy

Fig. 7. World Expo 2010, Shanghai. Competition design awarded second place, architects Ingarden K. and Ewy J.

Ciągłość logiczna i formalna zaistniała na przykład w pawilonach Wielkiej Brytanii (rys. 8) czy Danii.



Rys. 8. Expo 2010, Szanghaj. Widok ogólny efemerycznego pawilonu Wielkiej Brytanii autorstwa pracowni Heatherwick Studio

Fig. 8. World Expo 2010, Shanghai. General view of the ephemeral Great Britain pavilion by Heatherwick Studio

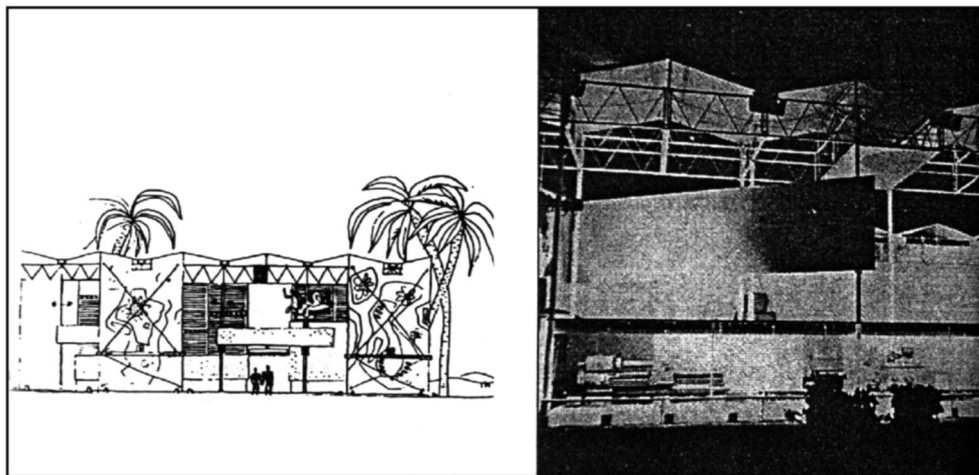
## 5. Konstrukcja – opakowanie

Tradycja związku konstrukcja – forma, realizująca się w interesujących pawilonach wystawowych nie jest w Polsce nowością wynikającą z ostatnich wystaw Expo. Obiektami zakładającymi pewien stopień prefabrykacji, łatwości budowy i demontażu były konstrukcje sięgające lat 50.<sup>3</sup> Jerzy Sołtan był twórcą pawilonów wystawowych o konstrukcji namiotowej do krajów tropikalnych (rys. 9). Obiekty te, pomimo czysto pragmatycznej funkcji i z pewnością niewysokiego budżetu, są wynikiem mariażu technologii i inspiracji elementami dziedzictwa kulturowego krajów docelowego przeznaczenia.

Konstrukcja jako element budowlany kształtujący jego formę, w każdym z polskich współczesnych pawilonów odgrywa inną rolę. Obiekt z wystawy w Hanowerze eksponuje ją bez jakiegokolwiek skromności, uznając jej równorzędny wkład do całości. Co więcej – podpory pawilonu zostały dodatkowo wzmocnione wizualnie poprzez okładzinę drewnianą. Każdy z elementów ustroju konstrukcyjnego jest widoczny i używany ze względu na swój architektoniczny wyraz. Odmienne podejście prezentuje obiekt WWA, gdzie ukazanie konstrukcji byłoby najprawdopodobniej zepsuciem efektu dramatyzmu jego formy. Widoczne belki czy słupy zażęgnują uczucie ciekawości, niepewności czy nawet lekkiej obawy w obcowaniu z obiektem – dają logiczne podstawy, pozbawiając pierwsze wrażenie uczucia niezwykłości. Konstrukcja służy wykreowaniu stroju architektonicznego danego obiektu, a jej zasadnicze cechy są skrzętnie ukryte z zamiarem pozbawienia przypisywanego im znaczenia. Obraz kompletny ma

<sup>3</sup> Np. pawilony polskie z zastosowaniem przekryć z tkanin projektu Z. i O. Hansenów we współpracy z konstruktorem L. Tomaszewskim oraz np. Pawilon „Tropik” z 1954 r. projektu J. Sołtana i Z. Ichnatowicza, konstrukcja W. Zalewski, malarstwo J. Pałka [3].

przemawiać do widza jak dobra magiczna sztuczka, w obliczu której docieklawy umysł szuka odpowiedzi, a widowisko staje się tym bardziej frapujące. Nie zmienia to oczywiście faktu, jak istotne jest właściwe połączenie osiągnięć technologicznych z zamierzonym efektem. Podobną tendencję wykazuje większość pawilonów światowej wystawy z Szanghaju, uznając za kluczową kwestię oddziaływanie materiału, kształtu, koloru i skojarzeń.



Rys. 9. Pawilon „Tropik” – lekka modułarna konstrukcja ze skręconych kratownic obleczonej płótnem, architekt prowadzący Jerzy Sołtan

Fig. 9. The “Tropik” pavilion – lightweight modular design with steel framework covered with linen, lead architect: Jerzy Sołtan

Inaczej wyglądała sytuacja dotycząca projektu pawilonu na wystawę w japońskim Aichi, gdzie architekci dostali do zagospodarowania przestrzeń określoną przez stalowy szkielet. Wydaje się, że mogło to stanowić ograniczenie, ale polska realizacja w bardzo udany sposób uciekła od brzemienia takiej struktury. Wiklinowa powłoka otuliła miękko twardo cięty prostopadłościan, używając i pokazując go tylko tam, gdzie wydawało się to logiczne lub stanowiło interesujący detal.

Istotnym czynnikiem kształtowania obiektów – szczególnie dotyczy to dwóch ostatnich wystaw – wydaje się być łatwość i logika montażu, modularność. Pokazuje to wyraźnie zasada zastosowana w Japonii. Fasada o powierzchni kilkuset metrów kwadratowych złożona została z wykonywanych niezależnie od siebie modułów wiklinowych. Konieczność porządzenia sobie z zastanym kształtem obiektu nie zrujnowała na szczęście architektury – potwierdziła jedynie doskonały zmysł estetyczny i organizacyjny twórców, stanowiąc wyśmienite połączenie dzisiejszej technologii z tradycją rękodzieła.



## 6. Myśl przewodnia wystawy

Każda z wystaw Expo narzuca organizatorom i projektantom pewien kierunek myślenia poprzez hasło przewodnie.

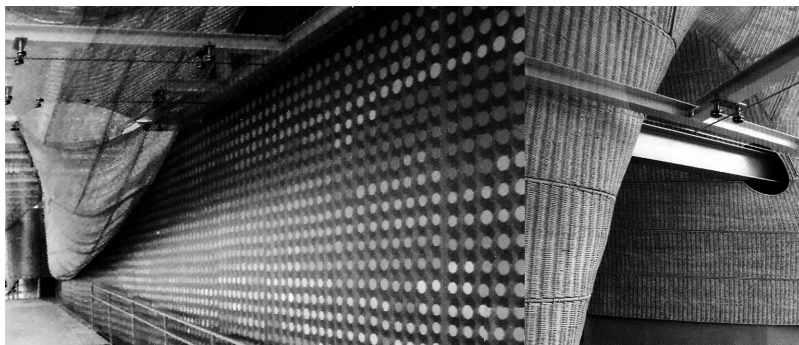
W Hanowerze hasło brzmiało: *Człowiek – Technika – Przyroda*. Pawilony tematyczne, za pomocą technik komputerowych, wizualizowały przyszłość społeczeństw i człowieka, z jego osiągnięciami, zapewniając godziny rozrywki i edukacji. Substancja architektoniczna na Wystawach Światowych, podobnie jak media, ma „dystrybuować” informacje jasno i dobitnie.

Architektura polskiego pawilonu komunikowała się z odwiedzającym językiem prostym, jasnym, nie dając przestrzeni do domysłów i wątpliwości. Logiczna konstrukcja, przejrzyste (rzadkość na Expo 2000) wnętrza i wyraźne odwołanie się do natury stwarzały atmosferę zadowolenia i odprężenia. Przeszklony dach i ruchome – również przeszklone ściany, przepuszczały przez budynek powietrze i światło, które w naturalnie piękny sposób filtrowane były przez dużą ilość zieleni jaka wypełniała pawilon. Przyroda stała się trwałym elementem architektury, pozwalając się okiełznać w wydzielonej przez twórcę techniki przestrzeni. Ekspozycja wewnątrz nie nawiązuje dialogu z ideami niesionymi przez architekturę. Kompletnie zgubiła się *Technika* z myśli przewodniej wystawy, ustępując miejsca prząsłym chatkom i mylącej co do celowości przekazu ludowości. Oaza wykreowana za pomocą bardzo współczesnych środków wyrazu okazała się mieć niekompatybilny scenariusz. Założeniem wystawy było pokazanie możliwości osiągnięcia równowagi między rozwojem techniki, życiem człowieka i naturą co udało się, niestety, tylko częściowo.

*Macierz natury – sztuka życia – ekologia* taka myśl przyświecała wystawie w Aichi. Organizatorzy powtórnie postawili pytanie fundamentalne dla cywilizacji nowego wieku, pytanie bardziej precyzyjne niż pół dekady temu, ukierunkowane na związek człowieka z planetą, którą zamieszkuje i ich wspólną historię. Zrównoważony rozwój to kwestia, którą z maksymalną powagą powinni poruszyć urbaniści i architekci. Szczególnie ważne jest to pytanie w stuleciu następującym po wieku wojen, ogromnego skoku technologicznego, w stuleciu, dla którego drogowskazem powinny być wynikające z tej relacji wnioski.

Same przygotowania do wystawy dały asumpt wystawcom – przede wszystkim projektantom, do odpowiedzialnego podejścia do tematu. Tereny dla Expo 2005 wybrane zostały po wielokrotnych zmianach spowodowanych koniecznością zachowania terenów zielonych dla czwartego co do wielkości miasta Japonii – Nagoya. Stało się to oczywiste, że tak monumentalna i rozrośnięta impreza, jak pięć lat wcześniej, nie mogła odbyć się w obliczu poruszanego problemu.

Polski pawilon wystawowy hołduje idei Expo w sposób wyraźny, ale wyszukany, według oceniających go specjalistów [4] jest jedną z kilku najdoskonalszych odpowiedzi na postawione zagadnienia. Zamysł cechuje prostota w realizowaniu inspiracji i technice wykonania obiektu. Wykorzystanie tradycyjnego rzemiosła i bardzo polskiego materiału, jakim jest wiklina, spójne jest z założeniami projektowania w nurcie low-tech. Efekt końcowy zacinający delikatne obłoki złocistych paneli ze zdefiniowanymi liniami stalowej konstrukcji jest udany, wprost wykładający jak piękne może być współistnienie i zależność sztuki życia – mądrości pokoleń i nowoczesnych technologii w ujęciu ekologii (rys. 10 a, b). Takie kształtowanie architektury ponadto wg twórców przenosi istotny przekaz o naszym kraju:



Rys. 10 a, b. Strefa wejściowa polskiego pawilonu w Aichi. Detal architektoniczny ukazujący świetne wycucie w łączeniu materiałów z pozoru niekompatybilnych

Fig. 10 a, b. Entrance area of the Polish pavilion in Aichi. Architectural detail showing a great sense of combining seemingly incompatible materials

„Projekt pawilonu (...) jest próbą stworzenia wizerunku Polski jako kraju nowoczesnego, dynamicznie rozwijającego się technologicznie, a jednocześnie dbającego zarówno o historyczną pamięć i tradycję, rękodzieło i ekologię, jak też o współczesną kulturę i sztukę (...)” [1].

Pojęcie zrównoważonego rozwoju przyświecało również wystawie w Szanghaju, zwracając się bardziej w kierunku urbanistyki, zagospodarowania miast. Pawilon architektów Natalii Paszkowskiej, Marcina Mostafy i Wojciecha Kakowskiego – szczególnie rozpatrując projekt konkursowy, objawił się jako bardzo zdecydowany, bezkompromisowy i zamknięty. Dobór materiałów odnawialnych, nadających się do recyklingu jak drewno (sklejka), PCV czy szkło idzie w parze z formą z równą pewnością siebie.

Hasło *Lepsze Miasto, Lepsze życie* odnaleźć można głównie w decyzji o wykonaniu powłoki z przetworzalnych materiałów – reszta przekazu miała znajdować się w prezentacjach. Niestety scenariusz poza nieadekwatną do czasów i celów formą, stawiał nacisk głównie na przedstawienie Polski jako partnera gospodarczego w granicach Unii Europejskiej, zachęcając do zwiększenia napływu kapitału chińskiego czy ewentualnie turystyki. Przystarzała forma prezentacji audiowizualnej nie była pociągająca dla odwiedzających inaczej niż ze względów wynikających z egzotyki tematu.



Rys. 11. Expo 2010, Szanghaj. Fragment modułowej elewacji ze sklejki z widokiem na plac przedwejściowy

Fig. 11. World Expo 2010, Shanghai. Part of a modular elevation made of plywood and a view on the entrance square

Spośród trzech obiektów zaprezentowanych na następujących po sobie wystawach najlepiej i najtrafniej realizującym idee Expo był projekt z Aichi. Spójność architektury z wnętrzem i scenariuszem, plus olśniewające niemal zestawienie elementów tworzywa architektonicznego buduje kompletny i *mądry* obiekt.

## 7. Expo Park – wesołe miasteczko dzięki technologii

Skojarzenie terenów wystaw światowych Expo z wesołym miasteczkiem nie jest pozbawione racji, szczególnie po zmroku. Ilość bodźców generowanych przez zaprzęzoną technikę w obiektach wystawienniczych jest podwojona nocą, a hipnotyzujące, barwne oświetlenie przydaje cyrkowego nastroju. Słuszne jest założenie wystawców, iż odwiedzający chce się dobrze bawić, a niecodzienność takiego doświadczenia, iluzja niespotykanych na co dzień kształtów wyzwala w widzu oszołomienie i dziecięcą fascynację. Poprawny pawilon hanowerski nie bierze udziału w tej zabawie w sposób czynny, ale już „złocisty obłok” – jak zdarzało się nazywać pawilon z Aichi – tak. Bez skrępowania i wstydu udział w tej paradzie bierze „lampion” pracowni WWA.

Architektura powinna wyglądać dobrze nie tylko w dzień, ale i w nocy – pawilon nie może stawiać tylko na Witruwiuszowski kanon piękna. Expo to również lunapark i ogromny plac zabaw dla małych i większych dzieci. Konkurencja i obowiązujące zasady skutecznej reklamy zmuszają do przeanalizowania obiektu pod kątem jego zmienności i efektywności. Obserwując pejzaż nocny wystawy Expo ma się wrażenie, że właśnie zaczęto odliczanie do nadchodzącego Nowego Roku lub że nic, pomimo grawitacji, nie trwa w bezruchu. Wraz z rozwojem technik prezentacji multimedialnych zwiększało się ich znaczenie dla pawilonów, czyniąc każdy kolejny bardziej odważną manifestacją tych możliwości.

Istnieją charakterystyczne cechy miejsc, które przyciągają ludzi niezależnie od narodowości. Place zawsze koncentrowały energię i żywotność miast, podobny magnetyzm dotyczy dominant, punktów położonych wyżej od otoczenia. W Hanowerze Polacy zaoferowali gościom przestrzeń o cechach placu publicznego, co zdało egzamin. Wrażenie otwartości i komfortu takiego otoczenia spotkała się z bardzo korzystnym odbiorem. Zagospodarowanie i wielkość działek na wystawie w Japonii nie przeszkodziła w wygenerowaniu podobnej strefy. W Szanghaju udany był podłużny placyk przed obiektem, wykończony ciepłym drewnem i wyposażony w dopasowaną małą architekturę. Co mogło wyróżniać nasz pawilon ponad znaczną większość uczestników to niezrealizowany – niestety – ciąg będący kontynuacją ekspozycji. W pracy konkursowej został zaplanowany, aby poprowadzić zwiedzającego na najwyższy punkt budowli skąd – o czym wiedzieli projektanci – rozciągałby się zapierający dech widok na okolicę [5]. Żaden z naszych dotychczasowych pawilonów nie przekroczył bariery interakcji wykraczającej poza tradycyjną formułę zwiedzania. Ostatniemu dziełu prawie się to udało (rys. 13), lecz bariera ekonomiczna nie pozwoliła na wykonanie wejścia na jego dach.

Fantastycznym odejściem od typowej drogi umożliwiającej poznanie wystawy był obiekt wybudowany przez Danię, gdzie za pomocą łagodnych ramp i pożyczanych rowerów można było zapoznać się w tak wyjątkowy sposób z ofertą tego kraju.

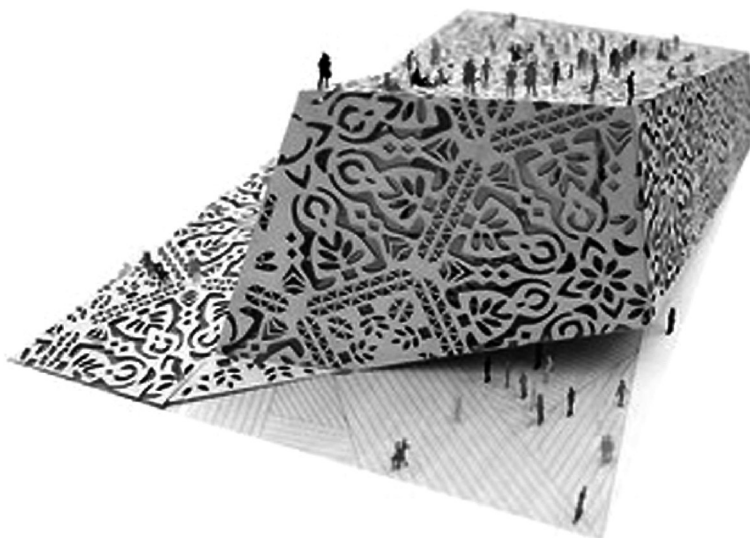
Być może jednym z kierunków poszukiwania przy następnej wystawie będzie kwestia pełniejszego, bardziej czynnego zaangażowania gościa w scenariusz zwiedzania.

Zakładając sens i sukces komercyjny dużo skuteczniejszą atrakcją jest diabelski młyn niż dzieło sztuki ludowej. Nie podważając znaczenia emanacji cech świadczących o tożsamości narodu, można podjąć próbę „opakowania” elementów ekspozycji o niezbywalnej wartości w sposób bardziej ekscytujący.



Rys. 12. Expo 2010, Szanghaj. Strefa wejściowa pawilonu polskiego w ujęciu nocnym

Fig. 12. World Expo 2010, Shanghai. Entrance area of Polish pavilion at night



Rys. 13. Expo 2010, Szanghaj. Koncepcja konkursowa zwycięskiego pawilonu zakładająca możliwość wyjścia na dach obiektu

Fig. 13. World Expo 2010, Shanghai. Competition entry awarded 1<sup>st</sup> prize – a pavilion with possibility of going out on the roof of the building

## 8. Wnioski

Rozwijająca się technika, tendencje ekologiczne, tematyka wystawy, kierunki w światowym designie, a także miejsce odbywania się Expo odciskają się w architekturze pawilonów. Zsumowanie zalet i niedociągnięć wszystkich trzech obiektów ułatwia stworzenie zestawu elementów zwiększających prawdopodobieństwo sukcesu komercyjnego. Zasada taka nie pozwoli z pewnością na stworzenie wzornika form architektonicznych, indywidualna kreacja jest rolą twórcy i kwestią jego wrażliwości i pomysłowości. Opinie przychylnie, czasem nawet entuzjastyczne dla obiektów poprzednich, przy okazji omawiania wyników konkursu na kolejny pawilon tracą na wyrazistości, co jest istotnym dowodem na ewolucję architektury wystawienniczej.

Skokiem jakościowym możliwym do zaobserwowania na trzech omawianych przykładach jest rola abstrakcji w kształtowaniu obiektu i odniesieniu np. do tematu wystawy. Pawilony wystawowe odrywają się od utrwalonego w umysłach ludzi pojęcia *budynek*, coraz mniej go przypominając. W Hanowerze polski pawilon dostał architekturę elegancką i współczesną, ale pozwalającą się zastosować w wielu typach obiektów użyteczności publicznej. Tego nie da się powiedzieć o pawilonie z Aichi. Wyróżniającą się bryłę wspiera w jej odmienności zastosowany materiał.

Abstrakcja jest coraz wyraźniejsza w idei i inspiracjach dla pawilonów. Jak pokazują kolejne budowle, pojedynczy motyw może zastąpić cały zestaw elementarnych pojęć kształtujących bryły budynków od stuleci.

Po zupełnie typowym podejściu do elewacji i konstrukcji polskiego pawilonu na Expo 2000, kolejne pawilony zacieśniały znaczenie tych elementów dla całości.

Eksperyment w ujęciu nowoczesności nie jest zbieżny z „próbą sił”, jaka miała miejsce jeszcze kilka dekad temu – to technologia i powłoka (skorupa) lub materiał są czynnikami nadrzędnymi. Obiekty są powlekane, tatuowane czy perforowane, często występuje multiplikacja tych samych elementów, co pokazuje nowe kierunki poszukiwań.

Jakość w każdym przypadku składa się z pojęć pomocniczych, bywa że są to przestrzeń, logika, harmonia, proporcje, konsekwencja albo wizjonerstwo, poetyka, wrażliwość, energia czy ruch – w następujących po sobie wystawach coraz większego znaczenia nabierają cechy świadczące o interdyscyplinarnym charakterze dzieła. Pojęcia te odwracane i wypaczane prowadzą do nowych odkryć. Rytm w odniesieniu do wzoru na powłoce budynku nie ma nic wspólnego z porządkiem podpierających obiekt filarów. Dla pawilonu Ingardena bardziej niż dla hanowerskiego więcej mówiącymi epitetami są właściwe np. dla poezji czy malarstwa. Zasadę tę kontynuuje forma obiektu z Szanghaju o rzeźbiarskiej dramatycznej bryle.

Wbrew chronologii okazuje się być jakość multimedialnej komunikacji z widzami, niestety, bo ten język w obliczu dominującej technologii i braków jej fizycznych ograniczeń jest skutecznym sięgaczem do umysłów odwiedzających. Pawilon z Aichi wychylił się przed stawkę, co w kontekście szybkiego rozwoju tej dziedziny i używanych przez nią narzędzi nie powinno mieć miejsca w 2010 roku. Jakość w ujęciu specyfiki i technologii produktu spełniająca wymagania użytkowników w zakresie funkcjonalności, praktyczności i ta określana przez jego własności handlowe nie rozkłada się po równo pomiędzy trzema pawilonami. Należy docenić pierwszy z nich za prostotę i funkcjonalność, ganiąc za brak przebojowości i chwytliwości z punktu widzenia marketingu. Ostatni zbierając noty za ekstrawagancką i rozwibrowaną powierzchność, utyka z merytorycznym przekazem. Rozwiązanie pawilonu z Aichi jest tu złotym środkiem, całościowo jednak będąc czymś więcej niż tylko kompromisem.



## Literatura

- [1] Ingarden K., *Pawilon polski na Expo 2005 – założenia autorskie*, Architektura – Murator, 07, Warszawa 2005, 31-32.
- [2] Jeleńska M., *Konkurs na projekt pawilonu polskiego na Światową Wystawę Expo 2005 w Japonii*, Architektura – Murator, 07, Warszawa 2004, 60-65.
- [3] Kysiak M., *Architektura pawilonów wystawowych*, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
- [4] Mimura M., *Polski pawilon na Expo 2005*, Architektura – Murator, 07, Warszawa 2005, 29-31.
- [5] Paszkowska N., Mostafa M., *Pawilon polski na wystawie Expo w Szanghaju – założenia autorskie*, Architektura – Murator, 09, Warszawa 2010, 48-49.
- [6] Stiasny G., *Pawilon Polski na Expo 2000*, Architektura – Murator, 08, Warszawa 1999, 53-56.
- [7] Zubeł H., *Komentarz do projektów konkursowych*, Architektura – Murator, 07, Warszawa 2004, 67-68.

## Źródła ilustracji

- Rys. 1. *Co zostaje po Expo*, Pańków J., Architektura – Murator, 09, Warszawa 2010, fot. dzięki uprzejmości asbl Atomium, s. 35.
- Rys. 2. Ibidem, fot. Bettmann/CORBIS, s. 35.
- Rys. 3. *Pawilon polski na Expo 2000*, Stiasny G., Architektura – Murator, 08, Warszawa 1999, wizualizacja Studio Architektoniczne sp. z o.o., s. 54.
- Rys. 4. *Pawilon polski na Expo 2005*, Mitura Mikihiko, Architektura – Murator, 07, Warszawa 2005, fot. Ingarden K., s. 29 i 33.
- Rys. 5. *Pawilon polski na wystawie Expo w Szanghaju*, Mycielski K., Architektura – Murator, 09, Warszawa 2010, fot. WWAA, s. 49.
- Rys. 6. Ibidem, s. 51.
- Rys. 7. *Projekt polskiego pawilonu na Expo 2010 w Szanghaju*, Stiasny G., Architektura – Murator, 03, Warszawa 2008, wizualizacja K. Ingarden, J. Ewy Architekci, s. 72.
- Rys. 8. *Expo 2010 w Szanghaju*, Mycielski K., Architektura – Murator, 09, Warszawa 2010, fot. Molenda M., s. 43.
- Rys. 9. Jola Gola: Jerzy Sołtan, Projekt 2/1958 r. za: *Architektura pawilonów wystawowych*, Kysiak M., Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998, s. 66.
- Rys. 10 a i b. *Pawilon polski na Expo 2005*, Ingarden K., Architektura – Murator, 07, Warszawa 2005, fot. Ingarden K., s. 33.
- Rys. 11. *Pawilon polski na wystawie Expo w Szanghaju*, *op. cit.*, str. 51.
- Rys. 12. Ibidem, fot. WWAA, s. 51.
- Rys. 13. *Projekt pawilonu polskiego na Expo 2010 w Szanghaju*, *op. cit.*, wizualizacja Karkowski W., Mostafa M., Paszkowska N., s. 71.

ADAM ŻABIŃSKI\*

STRATEGICZNE PROJEKTY URBANISTYCZNE  
W PRZESTRZENI MIASTA I PLANOWANIU JEGO  
ROZWOJU. WSTĘP DO PORÓWNIANIA PRZYKŁADÓW  
LUBLANY I KRAKOWA

---

STRATEGIC URBAN PROJECTS IN ARCHITECTURE  
AND DEVELOPMENT OF THE CITY. INTRUCTION TO  
COMPARISION OF LJUBLJANA AND CRACOW CASES

Streszczenie

W artykule zaprezentowano strategiczne projekty urbanistyczne występujące na terenie Lublany oraz Krakowa. Dokonano krótkiej charakterystyki tych inwestycji i przedstawiono tło w postaci wybranych tendencji i sił wpływających na rozwój miasta.

*Słowa kluczowe: strategiczne projekty urbanistyczne, projekty miejskie, planowanie strategiczne, projektowanie strategiczne, Lublana, Kraków*

Abstract

This paper presents strategic urban projects that are present in cities: Ljubljana and Cracow. Through short characteristic of these enterprises and with a use of sketch of the forces that influence development of cities author made an introduction to comparison studies of this topic.

*Keywords: strategic urban projects, urban projects, strategic planning, strategic urban design, Ljubljana, Kraków*

---

\* Mgr inż. arch. Adam Żabiński, studia doktoranckie, Wydział Architektury, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Obserwując współczesne miasta Europejskie, nie sposób zignorować pojawiających się na ich terenie wielkich inwestycji przestrzennych, przedsięwzięć nowego typu. Ich obecność wpływa nie tylko na wykreowanie nowego oblicza całych dzielnic, ale również są one wehikułami<sup>1</sup> zmian w kontekście społecznym, ekonomicznym oraz politycznym. Ich zwolennicy lubią podkreślać rolę, jaką odgrywają te projekty przy realizacji wizji i aspiracji lokalnej społeczności, przemian cywilizacyjnych, transformacji przestrzennej i szeroko rozumianej innowacji. Megainwestycje urbanistyczne, te nowe zwierzęta<sup>2</sup> w menażerii miejskich typologii, są obecnie przedmiotem dociekań naukowych szerokiego kręgu badaczy zajmujących się problematyką planowania przestrzennego na całym świecie.

Celem niniejszego artykułu jest wstępne rozpoznanie cech charakteryzujących Strategiczne Projekty Urbanistyczne w Europie Środkowej i w tym celu zaprezentowano przykłady Lublany i Krakowa. Ponieważ stolica Słowenii jest jeszcze stosunkowo mało rozpoznana (szczególnie w zakresie projektów strategicznych) w polskojęzycznej literaturze dotyczącej sztuki budowania miast, zdecydowano się uzupełnić jej opis skróconą historią rozwoju tego ośrodka.

### 1.1. Teoria i aparat pojęciowy

Pojęcie Strategicznego Projektu Urbanistycznego (w dalszej części artykułu posłużono się skrótem SPU) zdefiniować można za Oosterlynck i van den Broeck<sup>3</sup> jako „katalizator strukturalnych zmian wpływający w konkretny sposób na przestrzenny i społeczny kontekst”, który „ze względu na swój kompleksowy i wielowymiarowy charakter jest generatorem synergii pomiędzy aspektami: społecznymi, kulturalnymi, ekonomicznymi i przestrzennymi”. Można zauważyć, że jako element struktury miasta należy zaklasyfikować go do obiektów wyłamujących się tradycyjnym metodom interpretowania tkanki miejskiej. Jego obecność świadczy o stopniowym przejściu w stronę „urbanistyki strategicznej”<sup>4</sup>, będącej integracją strategicznego modelu planowania przestrzennego z architektoniczno-urbanistyczną aktywnością projektową. Co podkreślają wszyscy naukowcy, ma to związek z nowymi siłami oddziaływanymi na sposób, w jaki miasto się rozwija.

W interpretowaniu SPU szczególnie pomocna jest teoria „miejskich artefaktów” Rossiego, która pomimo podejścia do tego tematu w sposób nie bezpośredni<sup>5</sup>, określa spektrum za-

<sup>1</sup> W literaturze przedmiotu spotkać można różne przenośnie, za pomocą których badacze próbują scharakteryzować strategiczne projekty urbanistyczne i tym samym przybliżyć je odbiorcom. Zdaniem autora dobrze obrazują one dynamiczną i trudną do okiełznaną naturę tych przedsięwzięć. Określenie wehikuł zaczerpnięto z książki *Strategic spatial Project. Catalyst for change*, s. 5, natomiast zwierzę z *Megaprojects and Risk: An Anatomy of Ambition*, s. 1.

<sup>2</sup> j. w.

<sup>3</sup> W artykule zakreślono szerszy kontekst towarzyszący takim inwestycjom, łącznie z podaniem nowych, globalnych wytycznych prowadzących do zmian paradygmatu planistycznego. Samo pojęcie jest definiowane w *Strategic Spatial Planning and Strategic Projects. A transformative practice* na s. 4-5.

<sup>4</sup> Szerzej to pojęcie omówiono w książce *O tożsamości urbanistyki*, s. 38.

<sup>5</sup> Dla treści niniejszego artykułu ważne są szczególnie rozważania na temat pojęć: architektura miasta, artefakt miejski, proces projektowania urbanistycznego. Ich wyczerpujące omówienie zaprezentowano w książce *Architecture of the City*.



gadnień powiązanych z problematyką rozwoju miasta za pomocą poszczególnych projektów. Jedno z głównych założeń pracy włoskiego architekta, tłumaczące proces tworzenia miasta jako „otwarty”, jest fundamentem myślenia o projektach strategicznych.

Cechą SPU jest to, że powstają w odpowiedzi na potrzebę zmian, zgodnie z obraną strategią działania. Jednak ich obecność wpływa na pojawienie się kolejnych zmian, których są katalizatorem. W ten sposób SPU pozostają w obustronnej relacji z miastem, będąc obiektem wykreowanym w wyniku pewnego zapotrzebowania i samemu kreując kolejne, nowe zapotrzebowanie. Dzieje się tak dzięki ich skali, randze w strukturze miejskiej, wpływowi na transformację sąsiednich terenów i budowaniu wizerunku, co szczególnie podkreśla rola marketingu urbanistycznego we współczesnych koncepcjach zarządzania miastem. Jednak z racji swojej złożoności SPU są trudne do zaklasyfikowania i opisanego przy użyciu stworzonej typologii takich struktur. Powodem są problemy w wytypowaniu, które realizowane inwestycje są strategiczne tylko z nazwy, a które rzeczywiście pełnią taką rolę. Dlatego zdecydowano się na metodę analizy przypadków<sup>6</sup>, która pomimo swojej niedoskonałości pozwala przybliżyć cechy tych obiektów.

Dotychczas SPU są przedmiotem dociekań naukowców na polach planistycznym, geograficznym, ekonomicznym, politycznym czy zajmującym się metodami zarządzania miastem. Występuje jednak luka w interpretowaniu tego tematu z perspektywy badań związanych z projektowaniem urbanistycznym. Ten artykuł ma stanowić przyczynek do budowania wiedzy tego typu.

## 2. Przykład Lublany

W sercu jednej z mniejszych populacyjnie demokracji kontynentu, zamieszkałej przez naród o korzeniach średniowiecznych, leży niewielkie w skali fizycznej, a metropolitalne swoimi ambicjami miasto – Lublana. Ten niespełna 300-tysięczny ośrodek (256 881 miasta-rdzenia przy 456 915 osób w bezpośrednim zasięgu dojazdów do miejsc pracy metropolitalnego obszaru funkcjonalnego<sup>7</sup>) jest najbardziej zauważanym na międzynarodowej arenie miastem 2 mln Słowenii. Przepaść rozwoju między stolicą a pozostałymi miastami jest podobna do dystansu pomiędzy Warszawą i innymi polskimi miastami. Najbliżej stąd do Zagrzebia i Rijeki w Chorwacji, Klagenfurtu, Villach oraz Grazu w Austrii i Triestu wraz z Wenecją we Włoszech.

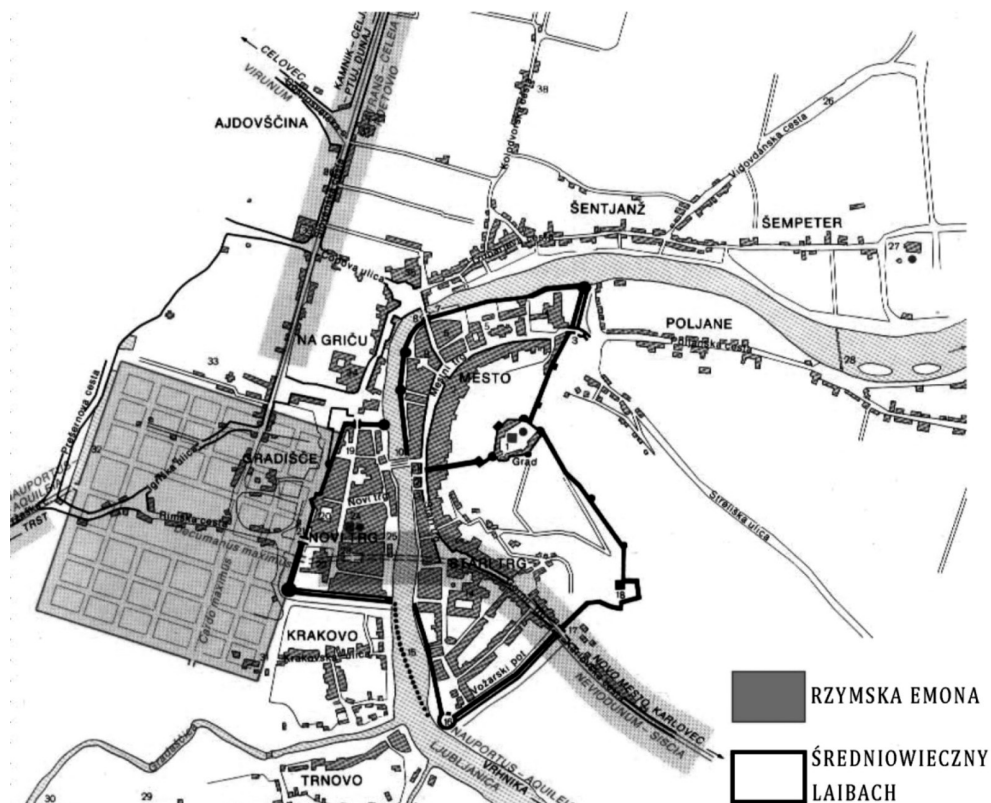
Można wyodrębnić siedem ogólnych faz rozwoju Lublany: rzymską, średniowieczną, barokową, późno XIX-wieczną, secesyjną, „Plečnikowej Lublany” oraz miasta stołecznego<sup>8</sup>. Geneza miasta związana jest z założeniem ufortyfikowanego obozu rzymskiego pod nazwą Emona w I w p.n.e. Pierwszą wzmiankę kronikarską o Lublanie datuje się na 1144 r, gdzie wystąpiło, jako niemieckie miasto – Laibach.

<sup>6</sup> Opisanie tego problemu występuje na stronach: *Five misunderstandings about case-study research*.

<sup>7</sup> Dane zamieszczone w najnowszej publikacji ESPON pod nazwą *POLYCE: Metropolisation and Polycentric Development in Central Europe*, s. 25.

<sup>8</sup> Osobliwą cechą Lublany, wyróżniającą ją z grona innych miast o podobnym rodowodzie jest fakt, że średniowieczne i renesansowe dziedzictwo tego ośrodka znajduje się niejako w „cieniu” późniejszych epok. Po części jest to spowodowane kataklizmami i dominującą rolą działalności Plečnika. Informacje o najważniejszych zabytkach powstałych w poszczególnych epokach znajdują się w prezentacji do wykładu „*The Urban Dynamics of Ljubljana: Land Use and Urban Renewal*”.

Ziemie te były się do końca I wojny światowej dziedziczną własnością dynastii Habsburgów, którzy rozwinęli Lublanę jako ważny ośrodek handlu i siedzibę duchowieństwa będącą w XVI w. centrum słoweńskiej reformacji. Jednak dopiero druga połowa XIX w. przyniosła rozkwit funkcji administracyjnych, ekonomicznych i kulturalnych tego miasta za sprawą min. poprowadzenia linii kolejowej Wiedeń–Triest, której Lublana od 1849 r była istotnym węzłem. To wydarzenie rozpoczęło nową kartę w historii miasta związaną z aktywnym udziałem w odbywającej się rewolucji przemysłowej. W rezultacie trzęsień ziemi z 1511 i 1895 r architektoniczne oblicze Lublany odmieniło się i do dziś można podziwiać barokowe i secesyjne założenia, przyczyniające się do rozpoznawalności miasta i jego fragmentów, w szczególności za sprawą geniuszu Jože Plečnika, którego twórczość przypada na odbudowę miasta po drugim z kataklizmów<sup>9</sup>.



Rys. 1. Historyczny kształt Lublany (źródło: Dimitrovska Andrews, 2008 s. 18)

Fig. 1. Ljubljana historical shape, source: (Dimitrovska Andrews, 2008 p. 18)

W okres międzywojenny Słowenia wkroczyła jako część państwowości Królestwa Serbów, Chorwatów oraz Słoweńców, przemianowanego w 1929 r na Królestwo Jugosławii. Po-

<sup>9</sup> Zob. „Ljubljana: from “beloved” city of the nation to Central European capital, s. 2-4.

śród wielu wzniesionych w tym czasie gmachów znalazły się i te najważniejsze zaprojektowane przez Jože Plečnika ( min. Biblioteka Narodowa). Liczba mieszkańców wzrosła do 90 000 dzięki wykorzystaniu szansy objęcia pozycji centrum handlu, kultury i sztuki Królestwa.

Hekatomba II wojny światowej pozostawiła miasto ze stosunkowo niewielkimi stratami dziedzictwa materialnego. Pomimo odgórnie ustanowionego przywództwa w postaci Ligi Komunistycznej pozostawiono namiastkę autonomii. Po długotrwałych studiach przestrzennych w 1965 r. uchwalono Ogólny Planu Zabudowy Lublany, który opierając się na przesłankach obecnych już w poprzednich opracowaniach planistycznych (Plan Regulacyjny Plečnika z 1926 r. oraz projekt Edvarda Ravnikara z 1943 r. dla Wielkiej Lublany), wyznaczył nowe standardy zgodnie z duchem epoki: strefowanie funkcji oraz przebieg infrastruktury. Ostatnim dokumentem jest plan „Lublana 2000” powstały w 1980 r., którego aktualność jest w dalszym ciągu doceniana m.in. za dostrzeżenie charakterystycznych typów zabudowy poszczególnych obszarów oraz za uznanie flankujących ośrodek terenów zielonych za ważne dla kształtowania przyszłej formy miasta<sup>10</sup>.

Podsumowując, należy napisać, że na obecny kształt Lublany największy wpływ mają historyczne wydarzenia, które były również udziałem innych miast Europy Środkowej: spuścizna austrowęgierskiego cesarstwa, powojenny rozwój według założeń ideologii socjalistycznej oraz przekształcenia demokratyczne i wolnorynkowe związane z transformacją ustrojową zapoczątkowaną w ostatniej dekadzie XX w<sup>11</sup>. Natomiast jej niewątpliwym wyróżnikiem jest twórczość Jože Plečnika, rzeźbiąca przestrzeń miejską w unikatowy sposób.

Opisując strukturę funkcjonalno-przestrzenną współczesnego miasta, należy przede wszystkim zwrócić uwagę na rolę czynników przyrodniczych kształtujących jego morfologię. W Lublanę „wgrzyżają” się od wschodu i zachodu dwa zielone kliny w postaci Wzgórza Zamkowego oraz Wzgórza Šišenskego (przechodzącego w Park Tivoli). Rzeka, w centralnej części obudowana i z przetworzonym korytem, odgrywa najważniejszą rolę przy definiowaniu pełnych życia przestrzeni publicznych historycznej starówki, która schodząc spod zboczy zamkowych, płynnie przechodzi w zabudowę historycznym rodowodzie tworząc przekonującą mozaikę form. Nie występuje tu charakterystyczna dla miast monarchii austrowęgierskiej obudowa rdzenia w postaci zielonego Ringu, a jedynie wewnętrzna obwodnica o cechach gwarnej ulicy. Struktura zabudowy ma czytelny, monocentryczny kształt z sześcioma odgałęzieniami rozchodzącymi się promieniście wzdłuż głównych kierunków komunikacyjnych wyprowadzających ruch na elipsoidalną obwodnicę. Dla stolicy Słowenii przyjęto gwiazdzysty model rozwoju, czytelny nie tylko w rysunku, ale również dostrzegalny z licznych punktów widokowych. Lublana jest pięknie osadzona w krajobrazie, z dominującymi szczytami Alp Południowych, które wydają się wyrastać tuż poza granicami miasta.

## 2.1. Lublana w procesie transformacji

Określenie „rodząca się metropolia” jest nie na miejscu, ponieważ już od czasów sporządzenia Planu Regulacyjnego przez Jože Plečnika posługiwano się terminem „Wielka Lublana”. Bardziej stosownie można napisać „wzrastająca”. Niemniej w świetle rozpoznanych w Europie ośrodków metropolitalnych rozmiar stolicy Słowenii sugeruje interpretowanie jej

<sup>10</sup> Szerzej w *Urban planning for the strategic spatial development of Ljubljana*, s. 3.

<sup>11</sup> Opisanie tego procesu znajduje się na stronach *Ljubljana: from beloved city of the nation to Central European capital*.

metropolitalności raczej w kategoriach funkcjonalnych i symbolicznych niż wielkościowych (Lublana nawet w zakresie regionu metropolitalnego posiada jedynie 650 119 mieszkańców przy ok. 4000 km<sup>2</sup> powierzchni). Należy jednak podkreślić, że tradycja myślenia o mieście w harmonijnym powiązaniu z otaczającym go obszarem ma co najmniej 100-letni rodowód.

Ostatni, nieprzerwanie trwający etap rozwoju Lublany zapoczątkowały przemiany demokratyczne schyłku XX w. W wyniku politycznych wydarzeń, poprzedzonych śmiercią prezydenta Jugosławii, naród słoweński w 1991 r. ogłosił niepodległość, rozpoczynając proces skutkujący dołączeniem do struktur Unii Europejskiej i uczestnictwem w „zachodnim stylu życia”.

Lublana zaczęła kształtować oddziaływania pochodzące z dwóch biegunów: zewnętrzne, wywołane otwarciem się na liberalną gospodarkę i procedury akcesyjne do UE oraz wewnętrzne związane z nowym statusem administracyjnym i niezbędną modernizacją. Świadomość rozwoju Słowenii, opartego na powiązaniach funkcjonalnych, o ponadregionalnym charakterze jest obecna co najmniej od czasów powojennych. Wyniki badań potwierdzają ten stan rzeczy i to niewielkie państwo ma status jednego z najbardziej policentrycznych krajów Europy<sup>12</sup>. Nie zmienia to jednak faktu ogromnej dominacji Lublany w słoweńskiej strukturze osadniczej. W skali NUTS 2<sup>13</sup> dostrzeżono, że aż 74% kraju, podzielonego na trzy ośrodki o znaczeniu międzynarodowym, ciąży funkcjonalnie w stronę stolicy państwa<sup>14</sup> (NUTS 2 odpowiada podziałowi na województwa w Polsce). Z kolei w zakresie NUTS 3 podział na 15 krajowych centrów, zasięg regionu funkcjonalnego Lublany odpowiada jednej trzeciej powierzchni kraju. Interpretacja tych wyników wskazuje, że choć w perspektywie wewnętrznej Lublanę można traktować jako element policentrycznej sieci osadniczej, to w kontekście międzynarodowym przestrzeń Słowenii jest prawie monocentryczna, gdyż stolica ma miażdżącą przewagę. Funkcjonalnie partnerów znajduje poza granicami, będąc węzłem sieci o ponad regionalnym, europejskim charakterze, co również wpływa na kierunek i formę bodźców rozwoju.

Oddziaływania zewnętrzne wpływające na dalszy rozwój Lublany można z grubsza podzielić na związane z: (I) globalizacją, europeizacją i liberalną gospodarką, (II) wzrastającą rolą technologii teleinformatycznych, (III) rosnącym znaczeniem usług, (IV) koniecznością intensyfikacji połączeń z najważniejszymi miastami i regionami, (V) demokratyzacją przestrzeni miasta, (VI) świadomością dbania o jakość środowiska naturalnego oraz (VII) nowym paradygmatem planowania opartym na zasadzie zrównoważonego rozwoju<sup>15</sup>.

Natomiast klasyfikację sił wewnętrznych restrukturyzujących miasto należy rozpocząć od opisu konsekwencji przestrzennych uczynienia z Lublany stolicy Słowenii. Według danych z 2000 r. ponad 40% wszystkich krajowych miejsc pracy w usługach sektora III<sup>16</sup> jest

<sup>12</sup> *Potentials for polycentric development in Europe. Final project report.*

<sup>13</sup> Nazewnictwo stosowane do opisanego jednostek terytorialnych poszczególnych państw członkowskich UE. Wyróżniono trzy poziomy: (1) regionalny, (2) wojewódzki i (3) podregionalny, ([http://www.stat.gov.pl/gus/5840\\_7551\\_PLK\\_HTML.htm](http://www.stat.gov.pl/gus/5840_7551_PLK_HTML.htm)).

<sup>14</sup> To ważne z perspektywy założeń planowania i projektowania strategicznego badanie znaleźć można w *Functional Regions Defined by Urban Centres of (Inter)National Importance – The Case of Slovenia*, s. 7.

<sup>15</sup> Informacje z zarysowanymi tendencjami wpływającymi na zmianę poszczególnych obszarów Lublany zawarte są w *The Urban Dynamics of Ljubljana: Land Use and Urban Renewal*, s. 30.

<sup>16</sup> Przyjmując umowną klasyfikację NACE: (I) rybołówstwo i rolnictwo; (II) wytwórczość i przemysł; (III) transport, hotelarstwo, finanse, telekomunikacja, usługi biznesu, nieruchomości, (IV) administracja publiczna, edukacja, obronność.

zlokalizowana na terenie funkcjonalnego obszaru miasta (co jest znaczące przy udziale populacji wynoszącym niecałe 25%). Ponad 60% wszystkich słoweńskich banków, towarzystw ubezpieczeniowych i innych instytucji ekonomicznych występuje w Lublanie, pokazując jak rozwinął się rynek usług finansowych i administracji publicznej po przekształceniu w stolicę. Wszystkie największe krajowe firmy prywatne mają swoją główną siedzibę w samym mieście lub w odległości do 60 km od niego<sup>17</sup>. Ponadto nie bez znaczenia były strukturalne reformy rynkowe wpływające na prywatyzację terenów, własność nieruchomości, deindustrializację, deregulację i zwroty mienia, które z kolei napędzają nową konfigurację zagospodarowania terenu. W konsekwencji nieplanowanego wzrostu związanego z okresem przejściowym, lokalne władze były zmuszone do nadążania za rozpełzającą się zabudową mieszkaniową, która pojawiała się niezależnie od rozpoznawalnych wzorców przestrzennych czy rekomendacji projektowych i pociągała za sobą kolejne inwestycje związane z sektorem usług. Pomimo utraty dawnego znaczenia przemysł w funkcjonalnym regionie Lublany wykazuje większe zagęszczenie niż średnia krajowa i wytwarza produkty skierowane głównie na zagraniczne rynki. Początkowo inwestycje zagraniczne omijały ten obszar ze względu na bałkańskie sąsiedztwo i Słowenia musiała dowieść swojej stabilności, by obcy kapitał zaczął płynąć. Jednak eksperci w dalszym ciągu podkreślają niedostosowanie systemu zarządzania zagospodarowaniem terenu i zbyt wysokie ceny działek jako znaczące ograniczenie ściągania zagranicznych funduszy do modernizowania stolicy.

Podsumowując transformację Lublany, trzeba podkreślić, że w regionie zajmującym ok. 13% kraju wytwarzane jest 35% PKB, inwestowana jest ponad połowa środków, jakie wpływają do Słowenii z zagranicznych państw. Produktywność jest 25% wyższa, podobnie jak przeciętne płace. Składa się to na obraz miasta skupiającego znaczną część miejsc pracy w najważniejszych branżach: bankowość i finanse, ubezpieczenia, administracja publiczna wszystkich szczebli, centra badawczo-rozwojowe, firmy farmaceutyczne itd. Obrazu dopełnia prężnie działający sektor przemysłów kreatywnych, gdzie na szczególną uwagę zasługują biura architektoniczne, które w niespełna dwie dekady wyrobiły sobie ogólnoeuropejskie uznanie. Na terenach peryferyjnych działają zakłady przemysłowe, a przez znaczące różnice w cenach nieruchomości zlokalizowanych jest tam wiele osiedli mieszkaniowych generujących codzienny ruch wahadłowy do i ze stolicy. Wszystko to składa się na całościowy obraz Lublany jako miasta, które pomyślnie przeszło przez etap formowania się nowych struktur i z ośrodka o raczej symbolicznej randze z sukcesem weszło na ścieżkę rozwoju zarezerwowaną dla centrum gospodarki opartej na wiedzy.

Zakres oddziaływania wewnętrznego tendencji rozwojowych należy wymienić na podstawie zjawisk i działań takich jak: (I) komercjalizacja i gentryfikacja centrum miasta, (II) rewitalizacji i reurbanizacji śródmieścia, (III) wroście powierzchni obszaru potrzebnego do obsługi miasta i suburbanizacja, (IV) rozwój potrzeb w zakresie infrastruktury i komunikacji publicznej oraz (V) pojawianie się i zanikanie poszczególnych subcentrów miejskich<sup>18</sup>.

<sup>17</sup> *Ljubljana: from beloved city of the nation to Central European capital*, s. 10.

<sup>18</sup> *The Urban Dynamics of Ljubljana: Land Use and Urban Renewal*, s. 31.



## 2.2. Jože Plečnik i jego wkład w formowanie przestrzeni Lublany

Wyjątkowość prac Plečnika jest odczuwalna w całej Lublanie i nie ma wielu miejsc w Europie, gdzie znaleźć można podobnie symbiotyczne duety – miasta i twórcę je projektanta. Poza słoweńskim przykładem na myśl przychodzą: Gaudi – Barcelona, czy Aalto – Helsinki. Lecz tylko Plečnik w tym zestawieniu w pełni zasługuje na miano „twórcy miasta”. Wpływ jego działań widoczny jest w formie poszczególnych budynków, ale co ważniejsze również w całych założeniach urbanistycznych. Bez tej obecności Lublana byłaby zupełnie innym miastem.

Jože Plečnik urodził się w 1872 r. w rejonie Gradišče, będącym wówczas peryferiami, a dzisiaj prawie centrum stolicy Słowenii. Był adeptem Otto Wagnera, którego wpływ widoczny jest w dziełach Słoweńca pomimo wypracowania przez niego własnego stylu. Jest autorem niespełna 30 realizacji w samej Lublanie (choć również w Pradze i Wiedniu znaleźć można jego budowle), które z pozoru przypadkowo „porozrzucane” po mieście układają się, gdy im się bliżej przyjrzeć w logiczną i spójną całość. Razem składają się na unikatowy na skalę europejską model miasta tworzonego od środka przez jednego autora, kierującego się konsekwentnie wykonywaną i ciągle doprojektowywaną wizją przestrzenną swojego ukochanego miasta. Wszystkie realizacje, chociaż ich powstanie dzieli niekiedy 20 lat, scalają się w jeden wielki projekt miejski, składający się z mniejszych, pozostających we wzajemnej relacji części. Tworzy on kościec stolicy Słowenii, wytyczający jej najważniejsze przestrzenie i definiujący kierunki dalszego rozwoju. Tym Strategicznym Projektem Urbanistycznym jest *Plečnikowa Lublana*, śródmieście przeprojektowane przez architekta w okresie od 1920 do 1950 r.

Kontekst, w którym osadzone są projekty, wiąże się z tragicznymi wydarzeniami trzęsienia ziemi z 1895 r. i koniecznością odbudowy i nadania kształtu pasującego do nowego statusu miasta. W zaprezentowanym w 1929 r. Planie Regulacyjnym najbardziej dostrzegalne przez współczesnego obserwatora jest budowanie miasta przez budynki publiczne, które wytyczą korytarze przyszłych przekształceń. Pozostały obszar miasta został podzielony na parcele zgodnie z racjonalną zasadą geometryczną. Już w czasie prezentacji dostrzeżono nowatorskie ujęcie przestrzeni miejskiej, w której architekt traktował ją jako nierozdzielalną całość z pomijanymi do tej pory terenami północnej dzielnicy Bežigrad.

Dodatkowo Plečnik zaproponował przełomowe rozwiązanie, w którym miasto miało być odbierane zarówno przez spacerowicza, jak i podróżującego środkami transportu. Swój wydzźwięk miało to w rzeźbiarskim, bardzo drobiazgowym podejściu do detali projektowanych budynków. Plečnik zakładał, że będą one obserwowane z bliskiej odległości. Ponadto od czasu swoich podróży, w okresie od 1898 do 1899, architekt utwierdził się w przekonaniu o szczególnej roli niewielkich, praktycznych zabiegów urbanistycznych, ławek, lamp, balustrad czy fontann<sup>19</sup>. Te wypełniające przestrzeń „meble” miejskie pospołu z elementami inżynieryjnymi tworzyły wiązania odległych od siebie fragmentów miasta za sprawą swojej powtarzalności, wzajemnego zakomponowania oraz charakterystycznej i wysmakowanej plastyki. Rolą architekta było zrozumieć ich działanie w dużej skali, nadać im rytm oraz dynamikę. Doskonałym przykładem wdrożenia tej koncepcji jest ul. Zois, gdzie mieści się Wydział Architektury Uniwersytetu Lublańskiego i widoczna jest sekwencja drobnych ingerencji ujednocniająca przestrzeń na stosunkowo dużym obszarze.

<sup>19</sup> *Ljubljana – A Mediterranean City? Plečnik's Experiment*, s. 2.



Rys. 2. Porównanie propozycji planistycznych: a) Plan Regulacyjny Lublany, Max Fabiani (1895), b) Plan Regulacyjny Lublany, Jože Plečnik (1929) (źródło: Šašek Divjak, 2008, s. 2, 3)

Fig. 2. Comparison of planning proposals, source: (Šašek Divjak, 2008, p. 2, 3)



Rys. 3. Zestawienie projektów Plečnikowej Lublany (źródło: opracowanie własne autora)

Fig. 3. Presentation of Plečnik Ljubljana projects, source: author

Na szczególną uwagę zasługuje wkomponowanie w istniejącą tkankę miejską tych niewielkich, ale odczuwalnych elementów spajających przestrzeń. Architekt posłużył się barokowym zabiegiem wytyczenia nowych osi, wzdłuż których ustawione miały być najważniejsze gmachy o funkcji istotnej dla rangi miasta. Popularna anegdota mówi, że główna oś rozpoczyna się w zimowym pawilonie prywatnego domu Plečnika i biegnie aż do terenów kolejowych, kończąc się na budynku seminarium Baraga. Równoległe wzdłuż biegu Lublanicy zaprojektowany został ciąg przestrzeni publicznych wraz z towarzyszącymi obiektami, które swój koniec mają w kolumnadzie Hal Miejskich przy Smoczym Moście, symbolicznie wygradzającym śródmieście. Poza nim znajduje się jeszcze tylko wieńczący kompozycję próg wodny Zapora Sluice. Dwie wymienione osie posiadają szereg łączników, do których zalicza się wspomniana ul. Zois, Trnovski dopływ Lublanicy, który w swoim projekcie regulował Plečnik czy prowadząca w poprzecznym kierunku linia Gimnazjum Urszulank–Plac Kongresowy–Zamek Lublański. Układ wypełniały znakomite budowle, posiadające wyraziste cechy Słoweńskiej tożsamości – Cmentarz Žale, Biblioteka Narodowa i Uniwersytecka i inne. Zwieńczeniem całości kompozycji były mosty, które do dziś są najlepiej rozpoznawanymi dziełami autora. Budowle te pojawiły się w Lublanie nie tylko jako element inżynierski, ale przede wszystkim jako przedłużenie przestrzeni publicznej wiążące odseparowane od siebie fragmenty miasta. Są zaprojektowane raczej w postaci platform przedłużających ulicę i nadających jej dodatkowego uroku ozdobnika.

Należy raz jeszcze podkreślić wpływ Plečnika na kształt Lublany. Na zawsze będzie ona kojarzona z jego nazwiskiem, gdyż to on stworzył jej „markę”. Słoweński architekt był człowiekiem nader praktycznym i uważał, że językiem architektury są budowle, które twórca pozostawia po sobie następnym pokoleniom. Można przyjąć ogólne założenie, że wybitny architekt oddziałuje na co najmniej trzech polach: przez swoje projekty i realizacje, wychowując grono swoich uczniów oraz wnosząc wkład do teorii architektonicznej poprzez działalność pisarską i literacką. Słoweński architekt nie pozostawił po sobie żadnego spisane *credo*, jednak, gdy Rossi opisuje miasto tworzone z pojedynczych części, miejskich artefaktów<sup>20</sup>, a Taut w swojej książce pisze, że: „(...) Korona Miast to grupa budynków, zlokalizowana by wypełniać publiczne i społeczne cele, górując nad zabudową mieszkaniową”<sup>21</sup> dostrzegamy wyraźne powiązanie z efektami działań Plečnika w Lublanie.

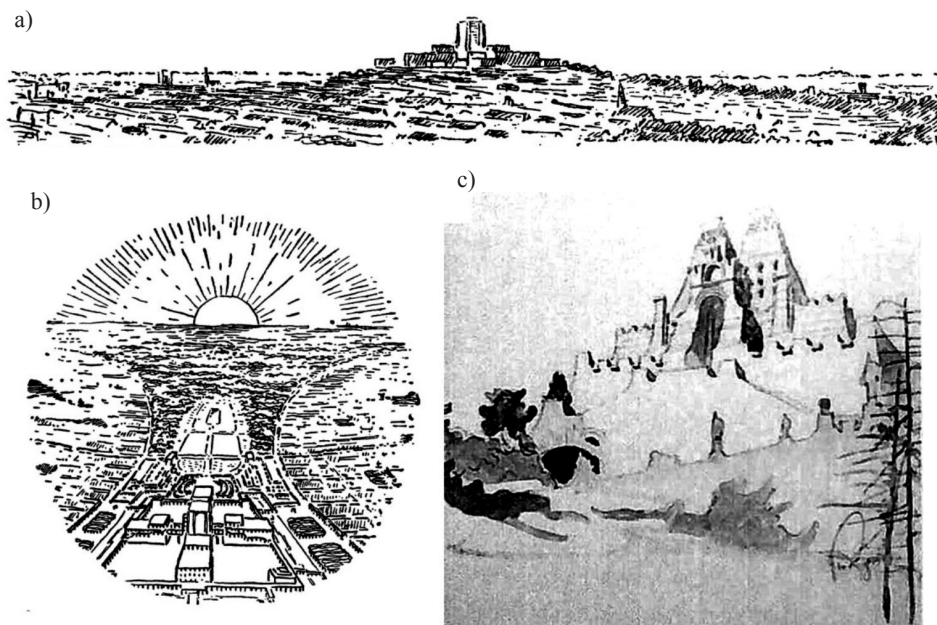
Plečnik łączył w sobie tradycje śródziemnomorskie o antycznych korzeniach z pragmatycznym, północno europejskim podejściem modernizacyjnym, charakterystycznym dla czasów, w których żył. W jednej ze swoich ostatnich realizacji, klasztorze Križanke, architekt zamieścił inskrypcję, łączącą w sobie barokowo-klasycyzm (ulubione epoki historyczne) przesłanie, które najlepiej charakteryzuje jego postawę: „Przemienisz, a tylko Twoje dzieła zapewnią pamięć o Tobie”<sup>22</sup>.

<sup>20</sup> *The Architecture of the City*, s. 116.

<sup>21</sup> *Die Stadtkrone*, s. 9.

<sup>22</sup> *Jože Plečnik: Architekt i Wizjoner*, s. 168.





Rys. 4. Wpływ twórczości Plečnika na Tanta: a), b) „Miasto Korona” – sylweta z widokiem z perspektywy miasta idealnego (źródło: B. Taut, Die Stadtkrone, Eugen Diederich, Jena 1919), c) „Korona Miasta” – sylweta Słowiańskiego Panteonu na Wzgórzu Zamkowym w Lublanie (źródło: J. Plečnik wg reprodukcji czasopisma „Volne Směry”, Lublana 1901)

Fig. 4. Comparison of drawings may suggest Plečnik influence on Taut works

### 2.3. Wstęp do analizy strategicznych projektów urbanistycznych w Lublanie

Jak na stolicę tak niewielkiego kraju Lublana zachwyca mnogością przeprowadzanych inwestycji o znaczeniu strategicznym. To Plan Regulacyjny Plečnika można uznać za pierwszy oficjalny dokument, który sugerowałby lokalizację i konieczność prowadzenia ważnych miejskich przedsięwzięć. Ramy prawne do realizacji inwestycji o charakterze strategicznym znajdują się obecnie w dwóch dokumentach: „Act of Public-Private Partnership, 2006”<sup>23</sup> oraz „Strategic Spatial Plan, Masterplan, Lubljana 2008”<sup>24</sup>.

W 2006 roku za sprawą zaangażowania „The Berlage Institute” powstało jeszcze inne opracowanie pod nazwą „Light Capital: Urban Scripts for Ljubljana”. Publikacja podsumowuje rok prac studialnych i prezentuje wynik możliwej strategii urbanistycznej opartej o wykreowanie policentrycznej struktury Lublany. Realizacja wielkich przedsięwzięć miejskich jest kluczowym zabiegiem do transformacji przestrzeni w tym kierunku. Książka nie posiada umocowania prawnego, a jedynie wskazuje, jakie zalety i w jaki sposób należy wykorzystać. Jest dobrze udokumentowaną wizją, tłumaczącą następstwa stawiania czoła wyzwaniom do-

<sup>23</sup> *Large scale Public/Private – Partnership redevelopment projects in Slovenia: case studies from the City of Ljubljana*, s. 1.

<sup>24</sup> *Urban planning for the strategic spatial development of Ljubljana*, s. 4.

tyczącym standardu życia mieszkańców, podnoszenia konkurencyjności gospodarczej i kreowania marki miasta bardziej zauważalnej na arenie międzynarodowej.

Punktem wyjścia w „Light Capital...” jest możliwość spożytkowania historycznego kapitału stolicy Słowenii i uzupełnienie go o nowy program funkcjonalny wraz z wytypowaniem listy koniecznych interwencji architektonicznych. W wymiarze geometrycznym przybrało to postać wzmocnienia historycznego centrum i rozlokowania w punktach przecięcia obwodnicy z głównymi kierunkami wyprowadzającymi ruch ze śródmieścia dużych inwestycji o zróżnicowanym przeznaczeniu<sup>25</sup>. Sugeruje to transformację układu urbanistycznego z monocentrycznego z promieniście rozchodzącymi się korytarzami rozwoju w stronę policentrycznej konstelacji, szanującej istniejącą hierarchię, lecz porządkującą ją i tworzącą nowy kontekst do rozbudowywania się na krawędziach miasta. Praca jest niezwykle interesująca z powodu swojego nieformalnego charakteru, a zarazem drobiazgowej analizy przesłanek rozwojowych i potencjalnej możliwości ich wdrożenia. Na dodatkową uwagę zasługuje również fakt, że jeden z autorów, Michale Schaefer, zdobył w 2008 r. główną nagrodę w konkursie na opracowanie planu rozwoju terenów przemysłowych w północno-wschodniej części miasta – Šmartinska.

Koncepcja rozwoju przestrzennego Lublany z 2002 r. definiuje nowe kierunki (min. rozwój zrównoważony, polepszenie jakości życia i większe „umiędzynarodowienie” się miasta) oraz wskazująca programy i projekty będące drogą do ich realizacji. W 2007 roku miasto przyjęło dokument pt. „Wizja miasta Lublana do 2025 roku”, gdzie umieszczono 22 projekty strategiczne z listy obejmującej ok. 100 propozycji<sup>26</sup>! Pokłada się w nich nadzieję na realizację celów strategicznych: (I) Miasto Idealne, (II) Miasto Zrównoważone, (III) Słoweńska Metropolia. Ponieważ Lublana jest najważniejszym ośrodkiem kraju, jego stolicą i najsprawniej działającym regionem, inwestycje podzielono ze względu na skalę oddziaływania na: ogólnonarodowe, regionalne i lokalne. Do tej pierwszej kategorii należy zaliczyć m.in.: budowę nowego centrum sportowego, nowego uniwersytetu wraz z biblioteką i centrum medycznego. Do drugiej: obiektów przetwarzania odpadów i produkcji energii, węzła transportu publicznego, parków technologicznych i rozrywkowych oraz narodowych parków przyrodniczych. Na poziomie lokalnym, miejskim wytypowano: wybudowanie wielofunkcyjnego dworca kolejowego z towarzyszącym programem komercyjnym, ponowne zagospodarowanie niewydołnych fragmentów miasta, podniesienie jakości istniejących ośrodków kulturalnych i sportowych oraz obiekty utylizacji i przetwarzania odpadów<sup>27</sup>. Na poziomie narodowym zaznaczono konieczność wzmocnienia rangi Lublany w Europejskiej sieci metropolitalnej i obrano kierunek na zmianę klasyfikacji typologicznej ESPON ze „słabego MEGA”<sup>28</sup> w stronę „Europejskiego silnika”. Zamierza się to uzyskać, wykorzystując usytuowanie miasta na przecięciu się kilku paneuropejskich korytarzy transportowych oraz wzmacniając jego dostępność komunikacyjną.

<sup>25</sup> *Light Capital: Urban Scripts for Ljubljana*, s. 233.

<sup>26</sup> *Strateški prostorski načrt Mestne občine Ljubljana*, s. 5.

<sup>27</sup> *Urban Land Use Management in Ljubljana: From Competitiveness to Sustainability – or vice versa?*, s. 11.

<sup>28</sup> Koncepcja przestrzenna opisu układu osadniczego. Akronim od ang. *Metropolitan European Growth Area*, co przetłumaczyć można jako Europejski Metropolitalny Obszar Wzrostu. Pojęcie zdefiniowane w raporcie ESPON 1.1.1.



Rys. 5. Wybrane projekty urbanistyczne (Lublany źródło: opracowanie własne autora)

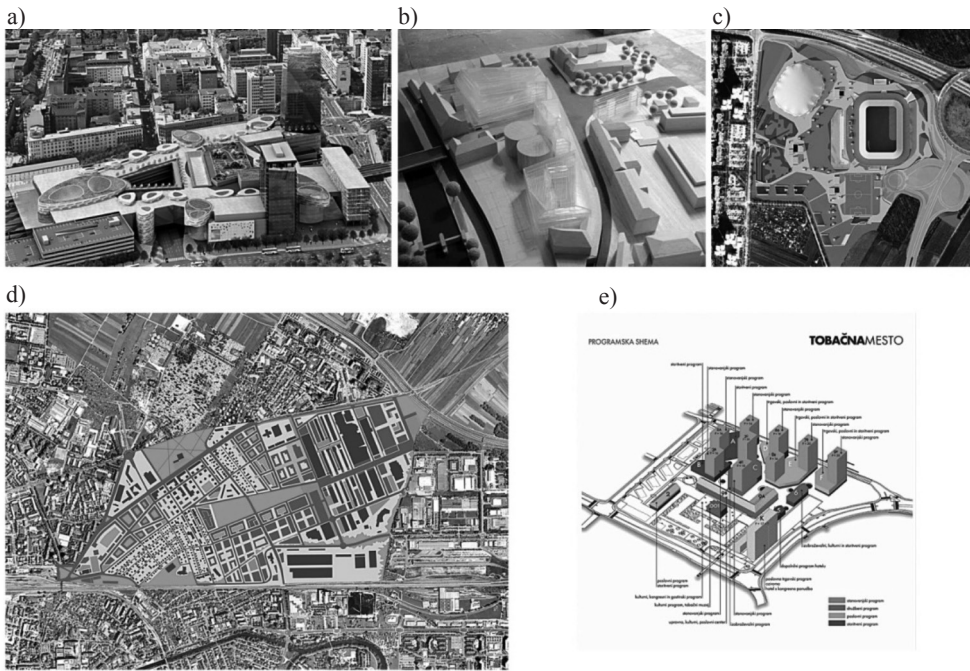
Fig. 5. Chosen urban projects from Ljubljana, source: autj or

Do bliższego scharakteryzowania wybrano 5 projektów na terenie Lublany. Pierwszym z listy jest Emonika City Center realizowany przez międzynarodową spółkę deweloperską Trigranit. Zakłada ona wykreowanie na terenach kolejowych wielofunkcyjnego centrum zintegrowanego transportu publicznego wraz z powierzchniami handlowymi, hotelowymi i biznesowymi. Ma powstać również wieża apartamentowca będąca punktem orientacyjnym dla całego miasta. Forma projektu zbliżona jest do megastruktury posiadającej owalne doświetlenia i akcenty zieleni. Wartość realizacji szacowana jest na 250 milionów Euro przy 196 000 m<sup>2</sup> powierzchni całkowitej.

„Sugar Factory” jest średniego rozmiaru projektem i gdyby nie jego wartość jako elementu infrastruktury transportowej nie byłby na tyle istotny, żeby znaleźć się na tej liście. Głównym założeniem jest przedłużenie arterii komunikacyjnej domykającej wewnętrzną obwodnicę centrum miasta w rejonie Zapory Sluice. Projekt dodatkowo ma za zadanie zrewitalizować zdegradowaną tkankę urbanistyczną przy skrzyżowaniu głównych dróg wyprowadzających ruch poza śródmieście. Przewidziany program zakłada lokalizację zabudowy mieszkaniowej i usługowej.

Trzecim przytaczanym projektem jest gigantyczne założenie centrum sportowego w Stożicach o krajowym znaczeniu. Po wielu perturbacjach związanych z wyłonieniem właściwego projektu zdecydowano się na koncepcję autorstwa biura Sadar&Vuga zakładającą wybudowanie stadionu piłkarskiego, dużej sali widowiskowej wraz z towarzyszącymi funkcjami parkingowymi i przebudową układu komunikacyjnego. Wartość projektu jest szacowana na 360 milionów Euro<sup>29</sup>.

<sup>29</sup> *Large scale Public/Private – Partnerships redevelopment projects in Slovenia: case studies from the City of Ljubljana*, s. 8.



Rys. 6. Prezentacja wybranych projektów urbanistycznych: a) Emonika City Center, b) Sugar Factory, c) Stožice Sports Park, d) Šmartinska Partnerships, e) Tobačna City (źródło: opracowanie własne autora)

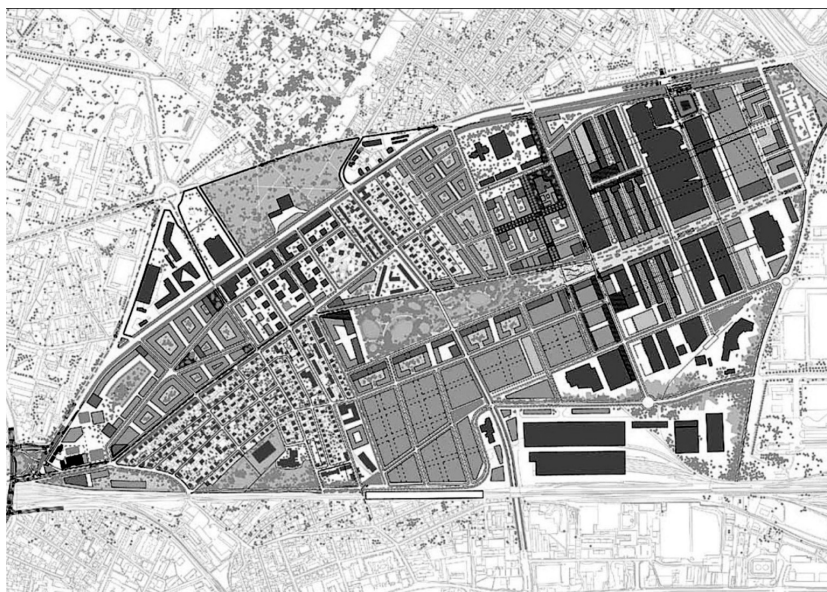
Fig. 6. Presentation of chosen urban projects, source: author

Największym z pokazanych projektów jest Šmartinska Partnerships. Koncepcja zagospodarowania tej dzielnicy Lublany powstała w wyniku międzynarodowego konkursu i jej autorem jest szwajcarskie biuro Hosoya Schaefer Architects. Jest to przykład projektu typu *large scale urban development*, powierzchnia przyjętego planu zabudowy to ok. 230 ha. Założenie ma być realizowane na terenach poprzemysłowych i ma na celu wytworzenie samowystarczalnej, nowoczesnej, zrównoważonej dzielnicy stolicy Słowenii. Ostatnim przytaczanym projektem wewnątrz miasta jest rewitalizacja zakładów tytoniowych. W ich miejscu ma powstać kwartał mieszkalno-usługowy i centrum kulturalne. Prestiżu inwestycji dodaje sąsiedztwie historycznej starówki oraz istniejące budynki administracji rządowej.

Zadanie, jakie postawiły przed sobą władze Lublany jest imponujące. Zaangażowanie w sporządzenie nowoczesnych dokumentów planistycznych, zakres inwestycji i stawiane cele mogą być wzorem dla innych środkowoeuropejskich miast szukających własnej drogi i metody rozwoju. Rozmach projektów strategicznych jest porównywalny ze skalą inwestycji w krajach „starej Unii” i zarówno przy ich realizacji, jak i w ich wyniku powstanie wiele nowych miejsc pracy, a przestrzeń miejska zostanie zmodernizowana. Zastanawia tylko fakt odejścia od tradycyjnej ścieżki rozwoju Lublany, którą z sukcesem realizował Plecnik. Zakładała ona organiczne transformowanie miasta spełniające oczekiwania odbiorców i oparte na zachowaniu skali człowieka. Realizacja tak imponujących projektów strategicznych, jak



te ujęte w dokumentach rozwoju Lublany, niesie ze sobą ryzyko charakterystyczne dla wielkogabarytowych inwestycji: globalizowania korzyści przy lokalnym ponoszeniu kosztów, uzależnieniu od czynników zewnętrznych i koniunktury oraz zatraceniu tożsamości miasta w wyniku zbytniego otworzenia się na międzynarodowe, a tym samym „bezstylowe” rozwiązania kompozycyjno-przestrzenne. Mała, jakby nie było, Lublana może paść ofiarą procesów globalizacji, co skutecznie powstrzyma jej rozwój zamiast mu służyć. W obecnej chwili jest jednak zbyt wcześnie żeby rozsądzić, na którą stronę przechyli się szala oceny.



Rys. 7. Plan zagospodarowania nowej dzielnicy Lublany – Šmartinska (źródło: Stanič, 2007, s. 6)

Fig. 7. Masterplan for a new district of Ljubljana – Šmartinska, source: (Stanič, 2007, p. 6)

### 3. Przykład Krakowa

W tej części pracy zarysowano sytuację Krakowa w zakresie realizacji inwestycji typu SPU. Rozdział ten jest kontynuacją badań, opublikowanych jako: „Strategiczne projekty urbanistyczne dla miasta innowacyjnego. Przykład Krakowa” i jest uzupełnieniem ilustrującym trzy obszary o strategicznym znaczeniu dla rozwoju miasta: Krakowskie Centrum Komunikacyjne, Zabłocie i III Kampus UJ.

Najważniejsze zagadnienie, które dotyczy opisywanego zjawiska w Krakowie, ma związek z pytaniem czy Strategiczne Projekty Urbanistyczne występują na terenie tego miasta. Od strony formalnej takie inwestycje są przewidziane jako środki wdrażające programy operacyjne, a tym samym mogą być aktywnym narzędziem polityki przestrzennej<sup>30</sup>. Ponieważ

<sup>30</sup> Opis roli projektów miejskich, wraz z propozycjami programów operacyjnych znajduje się w dokumencie *Zmiana Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego Miasta Krakowa w rejonie Sanktuarium Miłosierdzia Bożego w Łagiewnikach*, s. 243-245.

większość realizowanych przy współdziałaniu gminy miejskiej przedsięwzięć ma charakter obiektów infrastrukturalnych lub pojedynczych kubatur można odnieść wrażenie, że władze miasta nie są zainteresowane bezpośrednim udziałem w kreowaniu całościowej struktury urbanistycznej i przyjmują rolę organizatora odpowiednich warunków do wykorzystania przez prywatnych inwestorów.

Zapoznanie się ze „Studium...”, „Strategią rozwoju...”, czy „Wieloletnim Planem Inwestycyjnym” pozwala dostrzec, że postulowane przemiany funkcjonalno-przestrzenne Krakowa mają na celu wzmocnienie i rozszerzenie kompetencji metropolitalnych. Jednak miasto nie występuje jako podmiot inicjujący przekształcanie struktury całych zespołów zabudowy. Z drugiej strony unowocześnianie układu drogowego, integrowanie węzłów transportowych oraz ulepszanie sieci komunikacji publicznej może służyć przygotowaniu dodatkowych terenów pod zabudowę. W przeważającej liczbie znanych przypadków realizacji SPU towarzyszy radykalna przebudowa systemu transportowego. Powodowane to jest koniecznością zapewnienia najwyższej dostępności i zarazem konkurencyjności inwestycyjnej. Należy zaznaczyć, że szukanie związków i poziomu zintegrowania wizji rozwoju układu transportowego z potencjalnymi projektami miejskimi jest tematem czekającym na szersze opracowanie.

Przestudiowanie zapisów dotyczących inwestycji publicznych na przestrzeni ostatnich dekad wskazuje na rangę poszczególnych projektów, niezależnie od występujących zmian terminologicznych. Kontynuacja w dążeniu do zrealizowania danej inwestycji przy zastosowaniu różnych narzędzi planistycznych może dowodzić jej istotnego znaczenia dla rozwoju miasta. Najlepiej poświadcza ten fakt zestawienie postulowanych do realizacji projektów<sup>31</sup>.

Dodatkowym wyznacznikiem SPU dla Krakowa jest jego kontekst metropolitalny. Ze względu na pozycję w systemie osadniczym kraju oraz swoją wielkość to miasto jest obszarem przenikania się projektów służącym realizacji celów na różnych szczeblach: lokalnym, regionalnym i krajowym.

W oparciu o przeprowadzoną analizę dokumentów planistycznych<sup>32</sup> oraz własne studia przygotowano propozycję obszarów Krakowa posiadających strategiczne znaczenie dla rozwoju miasta, lokalizacji potencjalnych SPU. Zdecydowano się na szersze ujęcie kontekstu metropolitalnego, ujmując dwa obszary/projekty wychodzące poza granice administracyjne Krakowa.

Dobór przykładów jest wykonany według następującego klucza:

- wszystkim projektom towarzyszą znaczące przemiany infrastruktury komunikacyjnej;
- każdy z projektów nawiązuje do rozpoznanych klas typologicznych SPU w miastach europejskich: KCK – przebudowa śródmieścia, które można traktować jako centrum wielkomiejskie; Zabłocie – projekt typu riverfrontu; III Kampus UJ – *smart city*, czyli projektu budującego innowacyjność miasta.

Zaprezentowana na następnych stronach charakterystyka ma na celu pokazanie przemian przestrzennych, które zaszły na przestrzeni lat 2002–2012. Kolorem zaznaczono fragmenty tkanki miejskiej proponowane do realizacji, których projekty są dostępne w internecie. Dalsze badania tych projektów, obszarów o strategicznym znaczeniu dla rozwoju Krakowa, muszą być poprzedzone analizą czynników charakteryzujących Strategiczne Projekty

<sup>31</sup> Prezentacja wybranych projektów strategicznych (bez inwestycji typowo infrastrukturalnych), choć terminologicznie to pojęcie zmieniało swoją postać (inwestycje publiczne, projekty miejskie, projekty strategiczne) na terenie Krakowa.

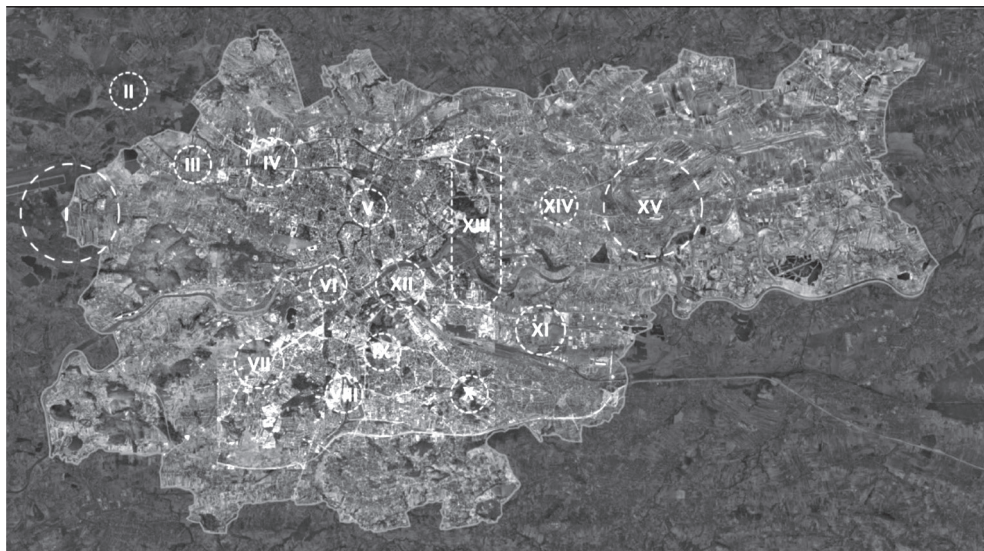
<sup>32</sup> Omówienie tej analizy zaprezentowano w opracowaniu pt.: *Strategiczne projekty urbanistyczne dla miasta innowacyjnego. Przykład Krakowa*.

## Wybrane kubaturowe projekty miejskie z zapisów dokumentów planistycznych Krakowa

| 1994 r.<br>(Plan ogólny)  | 2003 r.<br>(Studium uwarunkowań i kier. rozwoju <sup>2</sup> )  | 2010 r.<br>(Plan inwestycyjny <sup>3</sup> )   |
|---|---|--|
| <p>1. Most Legowski;</p> <p>8. Parkingi P+R;</p> <p>9. Most Kotlarski;</p> <p>11. Park miejski „Stalki Twardowskiego”;</p> <p>12. Kapłelska;</p> <p>14. Biblioteka Jagiellońska w ramach Kampusu UJ;</p> <p>15. Kampus Uniwersytetu Jagiellońskiego;</p> <p>16. Opera;</p> <p>17. Hala sportowo-widowiskowa;</p> <p>19. Adaptacja boczny tor kolejowej do Balic;</p> <p>20. Park technologiczny w ramach Kampusu UJ;</p> <p>21. Rewaloryzacja Kazimierza;</p> <p>22. Restrukturyzacja KZS „Solvay”;</p> <p>23. Centrum Komunikacyjne;</p> <p>25. Park przemysłowy w HTS;</p> <p>26. Lotnisko i dworzec w Balicach;</p> <p>31. Kapłelsko „Przystanek Rusiecki”</p> | <p>1. Program aktywacji gospodarczej:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- obszar Huty im. T. Sędzimir;</li> <li>- obszar w sąsiedztwie PL Kraków-Balice;</li> <li>- Zabłocie;</li> <li>- Centrum wystawiennicze i targowe;</li> <li>- Samorządowe Centrum Administracyjne;</li> <li>- Krakowskie Centrum Komunikacyjne;</li> </ul> <p>2. Program rewitalizacji terenów przemysłowych:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kraków-Wschód;</li> <li>- Zabłocie;</li> <li>- Płaszów;</li> </ul> <p>3. Program aktywizacji naukowo-technologicznej:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- III Kampus UJ;</li> <li>- Obszar Czynny-Dąbie;</li> <li>- Park Technologiczny w Branicach;</li> <li>- II Kampus AGH;</li> <li>- Regionalny rynek transferu technologii;</li> <li>- Parki technologiczne;</li> </ul> <p>4. Program rozwoju bazy turystycznej, rekreacyjnej i sportowej:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zakrzówek;</li> <li>- Przylasek Rusiecki;</li> <li>- Bągry;</li> <li>- Obiekty Twierdzy Kraków;</li> <li>- Krakowski Ośrodek Sportów Wodnych;</li> <li>- Wielofunkcyjna Hala Widowiskowo-Sportowa;</li> <li>- Uzdrowisko Swoszowice i Mateczny;</li> </ul> <p>5. Program ochrony i kształtowania przestrzeni publicznych:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Obszar śródmieścia (ochrona funkcji mieszkaniowych, kierowanie kompozycji urbanistyczno-architektonicznych);</li> <li>- Miejskie centra wielofunkcyjne;</li> <li>- Poprawa wizerunku miasta (w tym reklam i szyldów), kształtowania małej architektury;</li> <li>- Iluminacja Miasta (Śródmieście oraz Bulwary Wiślane);</li> </ul> <p>6. Program rewitalizacji dzielnic historycznych:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kazimierz;</li> <li>- Stare Podgórze;</li> </ul> | <p>SK-1 Centrum Widowiskowo-Parkowe (ukł. drogowy);</p> <p>SK-2 Centrum Kongresowe;</p> <p>SK-3 Centrum Jana Pawła II (ukł. drogowy);</p> <p>SK-4.1 Modernizacja stadionu piłkarskiego „Wisła Kraków”;</p> <p>SK-4.2 Modernizacja stadionu miejskiego „Cracovia”;</p> <p>SK-4.3 Modernizacja stadionu „Kolumbia”;</p> <p>SK-4.4 Rozbudowa OSIR „Kolumbia”;</p> <p>S-2.2 Budowa parkingu podziemnego ul. Focha;</p> <p>S-2.3 Budowa parkingów wielokondygnacyjnych;</p> <p>S-2.4 Budowa parkingu podziemnego „Nowy Kleparz”;</p> <p>S-3.1 Budowa Centrum Obsługi Inwestora;</p> <p>S-3.2 Budowa Ratusza Miejskiego;</p> <p>S-5.1 R Budowa centrum kulturowego „Kwartal św Wawrzyńca”;</p> <p>S-5.3 R Utworzenie Muzeum Sztuki Współczesnej;</p> |

Źródło: opracowanie własne autora, na podstawie Uchwały Nr VIII/558/94 z 16 listopada 1994 r. w sprawie miejscowego planu ogólnego zagospodarowania przestrzennego Miasta Krakowa; Zmiana Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego Miasta Krakowa w rejonie Sanktuarium Miłosterdzia Bożego w Łagiewnikach; Wieloletni Plan Finansowo-Inwestycyjny Miasta Krakowa na lata 2010–2019.

Urbanistyczne, tzn. określeniem trybów konfigurowania (trybów zintegrowania) przez: (I) infrastrukturę transportową, (II) elementy przyrodnicze, (III) relacje architektoniczno-urbanistyczne poszczególnych elementów oraz (IV) zastosowane strategie (dobra publicznego, modernizacji, marketingu urbanistycznego, równoważenia, integrowania<sup>33</sup>).



Rys. 8. Mapa dostrzeżonych obszarów strategicznych interwencji w Krakowie: LEGENDA: I – Miasteczko lotnicze Balice; II – Krakowski Biznes Park; III – Drugi Kampus AGH; IV – Rondo Ofiar Katynia; V – Krakowskie Centrum Komunikacyjne; VI – Monte Casino-Kapelanka; VII – Trzeci Kampus UJ; VIII – Łagiewniki; IX – Bonarka; X – Prokocim; XI – Płaszów–Rybitwy; XII – Zabłocie; XIII – Nowohucka-Czyżyny; XIV – „stara” Nowa Huta; XV – Nowa Huta-Branice (źródło: opracowanie własne autora)

Fig. 8. Map of spotted areas of strategic importance in Krakow: LEGEND: I – Aerocity Balice; II – Krakow Biznes Park; III – AGH Second Campus; IV – Ofiar Katynia Roundabout; V – Krakow Transport Center; VI – Axis Monte Casino-Kapelanka; VII – UJ Third Campus; VIII – Łagiewniki; IX – Bonarka; X – Prokocim; XI – Axis Płaszów-Rybitwy; XII – Zabłocie; XIII – Nowohucka-Czyżyny; XIV – „old” Nowa Huta; XV – Axis Nowa Huta-Branice, source: author

### 3.1. Obszar Krakowskiego Centrum Komunikacyjnego (KCK)

Jest to przykład najlepiej rozpoznanego projektu typu SPU na terenie Krakowa. Bliskie sąsiedztwo historycznej starówki, przecięcie się tras obwodowych z trasą kolei oraz linii komunikacji publicznej, dworzec PKP i wiele istotnych funkcji miejskich sprawia, że występuje tu nagromadzenie konfliktów przestrzennych. Z racji swojej wagi dla budowania wizerunku śródmieścia występuje wiele kontrowersji względem propozycji przekształcenia tego obszaru. Prace nad planami dotyczącymi koncepcji rozwoju rozpoczęły się w 1963 r. i trwają do dzisiaj. Osobnym problemem jest również zdefiniowanie granic tego obszaru.

<sup>33</sup> *O tożsamości urbanistyki*, s. 97.



Najwięcej nadziei budziły plany przebudowy KCK przez Tishman Speyer Properties, które razem z Gminą Kraków rozpoczęło działalność na zasadzie partnerstwa publiczno-prywatnego<sup>34</sup>. Niestety nie udało się osiągnąć zamierzonych celów i obecnie projekt składa się z realizowanych niezależnie od siebie, indywidualnych przedsięwzięć.



Rys. 9. Mapa przemian przestrzennych w okolicy KCK 2001–2012 r., powierzchnia – ok. 77,5 ha, Gęstość zaludnienia – ok. 1 624 os/km<sup>2</sup>, Projekty kubaturowe – 25 proj. (źródło: opracowanie własne"ewqtce)

Fig. 9. – Map of spatial transformations in KTC area, year 2000–2012, Area – ca. 77,5 ha, Population – ca. 1 624 os/km<sup>2</sup>, Spatial projects – 25 proj. source: author

### 3.2. Obszar Zabłocia

Zabłocie jest poprzemysłową dzielnicą Krakowa usytuowaną na obrzeżach historycznej dzielnicy Starego Podgórze. Do 2002 r. obszar ten był zmarginalizowany ze względu na słabą dostępność komunikacyjną, brak atrakcyjnych przestrzeni publicznych i zabudowę o niskiej wartości funkcjonalnej i estetycznej. Na przestrzeni ostatniej dekady zaszły znaczące zmiany, gdyż wybudowano: Most Kotlarski, Krakowską Akademię im. Frycza Modrzewskiego, Muzeum Sztuki Współczesnej, Muzeum w Fabryce O. Schindlera, uzupełniono miejski układ komunikacji zbiorowej i prywatnej. Na terenie dzielnicy obowiązuje plan miejscowy i program rewitalizacji, które regulują rozwój przestrzenny.

<sup>34</sup> *Wielkoprzestrzenne projekty inwestycyjne w strefach śródmiejskich*, s. 8.



Rys. 10. Mapa przemian przestrzennych w okolicy Zabłocia 2001–2012 r., powierzchnia – ok. 148 ha, Gęstość zaludnienia – ok. 309 os/km<sup>2</sup>, Projekty kubaturowe – 24 proj. (źródło: opracowanie własne autora)

Fig. 10. Map of spatial transformations in Zabłocie area, year 2000-2012, Area – ca. 148 ha, Population – ca. 309 os/km<sup>2</sup>, Spatial projects – 24 proj. source: author

### 3.3. Obszar III Kampusu UJ

Historia części Krakowa, w której ulokowany jest omawiany projekt, jest dosyć krótka. Jeszcze do lat 90. ten teren przypominał strefę podmiejską. Intensywne, choć w dużej mierze wymykające się planistycznej kontroli, procesy urbanizacyjne doprowadziły w krótkim czasie do rozkwitu nowej dzielnicy mieszkaniowej – Ruczaju.

W 1997 r. utworzono tu Specjalną Strefę Ekonomiczną Krakowskiego Parku Technologicznego – Pychowice. Dodatkowo ulokowanie III Kampusu UJ pozwoliło na zerwanie z wizerunkiem „sypialni” Krakowa. Obecnie infrastruktura transportowa jest bardzo dobrze rozwinięta, miejsce jest łatwo dostępne ze względu na wybudowaną linię tramwajową, przebudowę głów-

nej arterii samochodowej i bliskość zjazdu z autostrady A4. Kampus jest położony w niezwykle cennych przyrodniczo obszarach (m.in. Zakrzówek), dodatkowo wzdłuż jego północno-wschodniej granicy biegnie trasa proponowanego Kanału Krakowskiego. Rozwój terenu jest podporządkowany zapisom miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego.

W skład Kampusu wchodzi wiele budynków dydaktycznych i biurowych. Na uwagę zasługuje realizowany przez Jagiellońskie Centrum Innowacji kompleks Park Life Science. Całość założenia urbanistycznego UJ ma posiadać ok. 25 000 m<sup>2</sup> powierzchni, lecz jest uzupełniana przez pojawiające się budynki biurowe prywatnych przedsiębiorstw.



Rys. 11. Mapa przemian przestrzennych w okolicy III Kampusu UJ 2001–2012 r., powierzchnia – ok. 131 ha, Gęstość zaludnienia – ok. 3 827 os/km<sup>2</sup>, Projekty kubaturowe – 17 proj. (źródło: opracowanie własne autora)

Fig. 11. Map of spatial transformations of UJ Third Kampus, year 2000–2012, Area – ca. 131 ha, Area – ca. 3 827 os/km<sup>2</sup>, Spatial projects – 17 proj. source: author

#### 4. Wnioski

Warte ponownego podkreślenia są następujące wnioski płynące z przeprowadzonych badań:

1. Realizacja dużych inwestycji miejskich, Strategicznych Projektów Urbanistycznych jest możliwa i celowa nie tylko w największych i najbardziej wpływowych miastach Europejskich jak Londyn, Paryż, Amsterdam czy Hamburg.
2. Przygotowanie do tak radykalnego zabiegu, jakim jest wdrożenie Strategicznych Projektów Urbanistycznych wymaga wyprzedzającego przeanalizowania i drobiazgowych stu-

diów rangi ośrodka miejskiego na arenie międzynarodowej, w tym długotrwałego procesu dochodzenia do spójnej wizji rozwoju akceptowanej przez wszystkie podmioty biorące udział w inwestycji (ustalenie strategicznych ram projektów<sup>35</sup>) przy możliwie otwartej formule dopuszczającej wariantowanie i korygowanie inwestycji w trakcie jej realizacji.

3. Strategiczne projekty są istotne zarówno dla miast historycznych, jak i tych bez ściśle ulokowanego kapitału tożsamościowego w postaci dziedzictwa poprzednich epok. Bez względu na strategię rozwoju miasta opartą o eliminowanie zagrożeń przestrzennych zaburzających oryginalną formę miasta lub zakładającą rozwój na zasadach wolnorynkowych projekty strategiczne powinny być uwzględniane jako ważne ogniwo realizacji zakładanych celów transformacji przestrzennej.
4. Wpływ architekta–wizjonera na kształt przestrzeni jest niezwykle cennym zasobem, którym mogą się poszczycić nieliczne miasta. Jego pozytywne oddziaływania przekłada się na rozpoznawalność marki miejskiej, respektowanie kontekstu i jak pokazuje badany przykład Lublany, poszanowania wytworzonego specyficznego *genius loci* przez przyszłe pokolenia projektantów.
5. Analizowanie realizacji Strategicznych Projektów Urbanistycznych w poszczególnych miastach europejskich jest cenną wskazówką wnoszącą wkład do budowania podstaw teoretycznych pod możliwości konfigurowania takich przedsięwzięć na obszarach, gdzie do tej pory nie występowały.
6. SPU w Krakowie wymagają dalszych prac badawczych dotyczących sposobów właściwego konfigurowania pakietów projektów, które nie są objęte jednym, całościowym zamierzeniem projektowym.

## Literatura

- [1] Broeck J. van den, *Strategic Spatial Planning and Strategic Projects, A transformative practice*, Lublana: 44th ISOCARP Congress 2008, prezentacja konferencyjna.
- [2] Dimitrovska A.K. *The Urban Dynamics of Ljubljana: Land Use and Urban Renewal*, COST Action TUD602 Land Management for Urban Dynamics, Lublana 2008, prezentacja konferencyjna.
- [3] Dimitrovska A.K., *Prostorska vizija "Ljubljana 2025"*, Urbanistični Inštitut Republike Slovenije, Lublana 2007.
- [4] Drobne S., Konjar M., Lisec A., Pichler-Milanović N., Zavodnik Lamovšek A., *Functional Regions Defined by Urban Centres of (Inter)National Importance – The Case of Slovenia*, Real Corp 2010: Cities for Everyone, Liveable, Healthy, Prosperous, Wiedeń 2010.
- [5] ESPON. *POLYCE: Metropolisation and Polycentric Development in Central Europe*, ESPON, Wiedeń, 2012.
- [6] ESPON, 1.1.1. *Potentials for polycentric development in Europe. Final project report*, Sztokholm, Nordregio 2004.

<sup>35</sup> Proponowane metody i techniki ustalania zasad integrowania interesów różnych aktorów o przestrzeń miejską opisano w książce: *Framing Strategic Urban Projects: Learning from current experiences in European urban regions*.

- [7] Flyvbjerg B., *Five misunderstandings about case-study research*, [w:] *Qualitative Research Practice*, (red.) Seale C., Gobo J., Gubrium F., Londyn, Sage 2004.
- [8] Flyvbjerg B., Bruzelius N., Rothengatter W., *Megaprojects and Risk: An Anatomy of Ambition*, Cambridg, Cambridge University Press, 2003.
- [9] Galusek Ł., *Jože Plečnik: Architekt i Wizjoner*, Międzynarodowe Centrum Kultury, Kraków 2006.
- [10] Krečič P., *Ljubljana – A Mediterranean City? Plečnik's Experiment*, Lublana 2009.
- [11] Krečič P., *Plečnik's Ljubljana*, Ljubljana Tourism, Lublana 2011.
- [12] Ljubljana, Glasilo Mestne občine, *Vizija Ljubljana 2025*, Ljubljana Municipality, Lublana 2007.
- [13] Lokalny Program Rewitalizacji Zabłocia, Kraków 2008.
- [14] Miejski Program Rewitalizacji Krakowa, Kraków 2009.
- [15] Oosterlynck S., Broeck J. van den, Albrechts L., Moulaert F., Verhet-sel A., *Strategic Spatial Projects: Catalysts for Change*, Oxon, Routledge, 2011.
- [16] Pichler-Milanović N., *Ljubljana: from „beloved” city of the nation to Central European „capital”*, 2005.
- [17] Pichler-Milanović N., *European Urban Sprawl: Sustainability, Cultures of (Anti)Urbanism and »Hybrid Cityscapes«*, 2007.
- [18] Pichler-Milanović N., Zavodnik Lamovšek A., *Urban Land Use Management in Ljubljana: From Competitiveness to Sustainability – or vice versa?*, Real Corp 2010: Cities for Everyone, Liveable, Healthy, Prosperous, Wiedeń 2010.
- [19] Prelovšek D., *Plečnik in Ljubljanski Grad*, Lublana, Lublanski Grad, 10.IV.2012, wykład.
- [20] Rossi A., *The Architecture of the City*, Cambridge, MIT, 1984.
- [21] Šašek Divjak M., *Urban planning for the strategic spatial development of Ljubljana*, Urbani izziv, Lublana 2008.
- [22] Salet W., Gualini E., *Framing Strategic Urban Projects: Learning from current experiences in European urban regions*, Oxon, Routledge, 2007.
- [23] Schaefer M., Spoelstra M., *Light Capital: Urban Scripts for Ljubljana*, Rotterdam, Berlage Institute, 2006.
- [24] Sitar M., Šubic-Kovač M., *Large scale Public/Private–Partnership redevelopment projects in Slovenia: case studies from the City of Ljubljana*, Lublana 2009.
- [25] SpaceSyntax. *Ljubljana, Smartinska – Urban masterplan*, broszura informacyjna, SpaceSyntax, Londyn 2009.
- [26] Stanič I., *Ljubljana – Partnership Šmartinska District Redevelopment*, broszura informacyjna, Miasto Lublana i partnerzy, Lublana 2007.
- [27] Strategia Rozwoju Krakowa, Kraków 2005.
- [28] Strateški prostorski načrt Mestne občine Ljubljana, Lublana, Urbanistični Inštitut Republike Slovenije, 2007.
- [29] Świrko B., *Komentarz do Miejscowego Planu Przestrzennego Zagospodarowania dla Obszaru Kraków Zabłocie*, Biuro Planowania Przestrzennego UMK, Kraków 2005.
- [30] Taut B., *Die Stadtkrone*, Jenna, Eugen Diederich Verlag, 1919.
- [31] Vogelij J., *Assesment of strategic spatial plan Ljubljana*, Soest: Ljubljana Municipality, 2008.

- [32] Volk J., *Functional urban areas and their role in the polycentric spatial development in Slovenia*, Lublana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, 2006, praca magisterska.
- [33] Wieloletni Plan Finansowo-Inwestycyjny Miasta Krakowa, Kraków 2010.
- [34] Zmiana Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego Miasta Krakowa w rejonie Sanktuarium Miłosierdzia Bożego w Łągiwnikach, Kraków 2010.
- [35] Zuziak Z.K., *O tożsamości urbanistyki*. Politechnika Krakowska, Kraków 2008.
- [36] Zuziak Z.K. *Krakowska Przestrzeń Metropolitalna*, *Urbanista*, 27 (3), 2005.
- [37] Zuziak Z.K., *Wieloprzestrzenne projekty inwestycyjne w strefach śródmiejskich*, [w:] *Wielkoskalowe projekty inwestycyjne jako czynnik podnoszenia konkurencyjności polskiej przestrzeni*, (red.) Markowski T., Biuletyn KPZK PAN, Warszawa 2004.
- [38] Żabiński A., *Strategiczne projekty urbanistyczne dla miasta innowacyjnego. Przykład Krakowa*, [w:] *Miasto innowacyjne Wiedza – Przedsiębiorczość – Marketing*, (red.) Makiela Z., Szromnik A., Studia KPZK PAN T.CXLI, Warszawa 2012.



## TREŚĆ

|  |     |
|--|-----|
| Anisimov S., Pandelidis D.: Modelowanie matematyczne nowoczesnego wymiennika do wyparnego ochładzania powietrza we współpracy z amerykańską korporacją Coolerado...                                    | 3   |
| Baster D., Zając W., Molenda J.: Chemiczna modyfikacja powierzchni $\text{LiFePO}_4$ dla uzyskania materiału katodowego dla ogniw litowych o wysokiej pojemności.....                                  | 23  |
| Binienda M., Just P., Komorowski J., Pokrzywa M., Wołowicz E.: Wpływ procesu azotonasiarczania na zmianę wymiarów czopa wału korbowego odlanego metodą <i>lost foam</i> ze sferoidyzacją „inmold”..... | 33  |
| Czora M., Gambuś F.: Samochodowe reaktory katalityczne oraz ich wpływ na środowisko...   | 41  |
| Dulian P., Wieczorek Ciurova K., Bąk W., Kajtoch C.: Możliwości wytwarzania zaawansowanej elektroceramiki na bazie tytanianu baru metodą mechanochemiczną.....   | 57  |
| Dworakowska S., Bogdał D., Majka T.M., Pieliowski K.: Określenie właściwości reologicznych surowców pochodzących z oleju rzepakowego.....  | 67  |
| Gądek S., Hebda M., Kazior J.: Zastosowanie dylatometrii w badaniach przemysłowych na przykładzie proszku ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L.....  | 77  |
| Gwadera M., Kupiec K.: Kinetyka adsorpcji – zastosowanie ułamków łańcuchowych w przybliżonych równaniach dyfuzji i adsorpcji.....  | 89  |
| Kaczor G.: Niezawodność wybranych par ciernych pierścieni tłokowy–tuleja cylindrowa .....  | 101 |
| Kica M., Ronka S.: Selektywne usuwanie herbicydów z wody z użyciem modyfikowanego polidwinylobenzenu.....  | 111 |
| Lorenc A.K.: Regulacje prawne dotyczące zabezpieczenia pojazdów szynowych w polskich przeprawach promowych.....  | 121 |
| Majka M., Majka T.M.: Przyszłość źródeł światła.....   | 135 |
| Majka T.M., Pieliowski K., Leszczyńska A.: Wpływ chłonności płynów eksploatacyjnych stosowanych w motoryzacji przez kompozyty PA-6/MMT na ich właściwości mechaniczne.....                             | 149 |
| Niewiarowski A.: Optymalizacja schematu ważenia terminów dla modelu wektorowego.....   | 155 |
| Ostrowska K., Szewczyk D., Sładek J.: Wzorcowanie systemów optycznych zgodnie z normami ISO i zaleceniami VDI/VDE.....   | 167 |
| Ozóg M., Lubczak J.: Zastosowanie oligoeterolu syntezowanego z melemu i węglanu propylenu do otrzymywania pianek poliuretanowych.....  | 181 |
| Pandelidis D., Rajski K.: Poprawa efektywności kombinowanych systemów klimatyzacyjnych i odsalających wodę morską wykorzystywanych przez korporacje naftowe .....                                      | 193 |
| Pastuszek P.D.: Badania termograficzne cylindrycznych paneli kompozytowych.....  | 213 |
| Pilecki R.: Zastosowania naziemnego skanera laserowego .....   | 223 |
| Podbiera-Matysik K., Gorazda K., Wzorek Z.: Efektywność oczyszczenia ścieków pochodzących z myjni samochodowej .....   | 235 |
| Rachwał B.: System detekcji światła z użyciem fotonowielaczy krzemowych.....   | 253 |
| Skoneczna-Łuczków J., Ciesielczyk W.: Analiza egzergetyczna suszenia fluidalnego .....   | 261 |
| Stańko K.: Przegląd i charakterystyka systemów parkingowych .....  | 269 |
| Stasiniewska M.: Architektura dla wszystkich a ekonomia przestrzeni .....  | 283 |
| Sulich P.J.: Wykorzystanie analogii równań różniczkowych do modelowania kości.....   | 293 |
| Szachniewicz B.: Koncepcja doboru uniwersalnego zespołu prądotwórczego wraz z agregatem chłodniczym do ciężkich lokomotyw spalinowych .....  | 311 |
| Szewczyk A.: Autentyzm rewitalizacji przez zabawę .....  | 321 |
| Świątek W.: Trzy polskie pawilony na Wystawy Światowe Expo – trzy stopnie jakości.....   | 331 |
| Zabiński A.: Strategiczne projekty urbanistyczne w przestrzeni miasta i planowaniu jego rozwoju. Wstęp do porównania przykładów Lublany i Krakowa .....  | 349 |

## CONTENTS

|  |     |
|--|-----|
| Anisimov S., Pandelidis D.: Numerical study of novel evaporative heat and mass exchanger in cooperation with American corporation Coolerado .....                                | 3   |
| Baster D., Zając W., Molenda J.: Chemical surface modification of $\text{LiFePO}_4$ as cathode material for high discharge capacity Lithium-Ion batteries .....                  | 23  |
| Binienda M., Just P., Komorowski J., Pokrzywa M., Wołowicz E.: Effect of change dimensions sulfonitriding crankshaft chop by lost foam cast of spheroidization in mold .....     | 33  |
| Czora M., Gambuś F.: Automobile exhaust catalysts and their impact on the environment.....   | 41  |
| Dulian P., Wieczorek Ciurowa K., Bąk W., Kajtoch C.: Towards production of advanced barium titanate electroceramics by mechanochemical synthesis .....                           | 57  |
| Dworakowska S., Bogdał D., Majka T.M., Pielichowski K.: Determination of rheological properties of raw materials of rapeseed oil origin .....                                    | 67  |
| Gądek S., Hebda M., Kazior J.: Advantage of dilatometric research in industry presented for ferritic stainless steel AISI 434I powder .....                                      | 77  |
| Gwadera M., Kupiec K.: Kinetics of adsorption – application of continued fractions to approximate equations of diffusion and adsorption .....                                    | 89  |
| Kaczor G.: Reliability of chosen friction pairs of piston ring–cylinder sleeve .....   | 101 |
| Kica M., Ronka S.: Selective herbicides removal from water using modified poly(divinylbenzene) .....   | 111 |
| Lorenc A.K.: Security regulations for railway vehicles on Polish ferries .....   | 121 |
| Majka M., Majka T.M.: The future of the light sources .....  | 135 |
| Majka T.M., Pielichowski K., Leszczyńska A.: The influence of absorption of fluids used in THR automotive industry by the PA-6/MMT composites on its mechanical properties ..... | 149 |
| Niewiarowski A.: Term frequency optimization for the vector space model .....  | 155 |
| Ostrowska K., Szewczyk D., Sładek J.: Calibration of optical systems according to ISO standards and VDI/VDE recommendations .....  | 167 |
| Ożóg M., Lubczak J.: Application of oligoetherol synthesised with melem and propylene carbonate for obtaining of polyurethane foams .....  | 181 |
| Pandelidis D., Rajski K.: Improvement of efficiency of combined air conditioning and water desalination systems used by oil companies .....                                      | 193 |
| Pastuszek P.D.: Thermographic testing of cylindrical composite panels .....  | 213 |
| Pilecki R.: The use of ground-based laser scanner .....  | 223 |
| Podbiera-Matysik K., Gorazda K., Wzorek Z.: Efficiency of treatment of wastewater from carwash .....   | 235 |
| Rachwał B.: System of light detection using silicon fotomultipliers .....  | 253 |
| Skoneczna-Łuczków J., Ciesielczyk W.: Exergy analysis of fluidized bed drying process .....  | 261 |
| Stańko K.: Overview and summary of parking systems .....   | 269 |
| Stasiniewska M.: Architecture for everyone vs economical space .....   | 283 |
| Sulich P.J.: The analogy between the differential equations used to modelling of the bone .....  | 293 |
| Szachniewicz B.: Concept selection of an universal genereting set with a refrigerating unit for heavy diesel locomotives .....   | 311 |
| Szewczyk A.: Authenticity of entertainment revitalization .....  | 321 |
| Świątek W.: Three Polish pavilions for World Expo – three levels of quality .....  | 331 |
| Żabiński A.: Strategic urban projects in architecture and development of the city. Intrudction to comparision of Ljubljana and Cracow cases .....                                | 349 |