

AGNIESZKA FLAGA-MARYAŃCZYK\*

WYBRANE PROCESY SUSZENIA TECHNOLOGICZNEGO  
Z ZASTOSOWANIEM POMP CIEPŁA

## HEAT PUMP DRYING FOR SELECTED TECHNOLOGIES

## Streszczenie

System suszenia pracujący w oparciu o pompę ciepła może stanowić alternatywę pod względem efektywności energetycznej, a także rozwiązanie problemu emisji z urządzenia suszącego do otoczenia. W instalacji do suszenia z pompą ciepła powietrze suszące cyrkuluje w zamkniętym obiegu, co umożliwia uniezależnienie realizacji procesu od warunków otoczenia, rekuperację energii i hermetyzację procesu. Zdolność ziębienia układu pompy ciepła wykorzystywana jest do odwilżenia powietrza procesowego, wychodzącego z komory suszenia, natomiast zdolność grzania ma zastosowanie przy ponownym podnoszeniu temperatury odwilżonego i ochłodzonego powietrza, które wraca do komory suszenia. W artykule zaprezentowano również przykładowe zastosowanie pompy ciepła w suszarkach bębnowych oraz koncepcję niskotemperaturowego systemu suszenia osadów ściekowych w oparciu o pompę ciepła.

*Słowa kluczowe: suszenie pompą ciepła, suszenie w zamkniętym obiegu, rekuperacja energii, suszenie osadów ściekowych pompą ciepła, pompa ciepła w suszarkach bębnowych*

## Abstract

A heat pump drying system can be an energy efficient alternative that also avoids emissions from the drying equipment to the environment. In this system load is dried by closed loop circulating air, treated in the heat pump. The refrigeration capacity of the heat pump is used to dehumidify moistened air while the heating capacity is used to reheat the cooled dry air. The paper presents also the examples of heat pump application in the heat pump tumble dryer and in the sewage sludge drying system assisted by a heat pump.

*Keywords: heat pump drying, closed loop drying, energy recuperation, sewage sludge heat pump drying system, heat pump tumble dryer*

\* Dr inż. Agnieszka Flaga-Maryańczyk, Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Suszenie jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych procesów jednostkowych w wielu gałęziach przemysłu (np. przemysł rolno-spożywczy, drzewny, papierniczy, farmaceutyczny, tekstylny), a także koniecznym do realizacji w inżynierii środowiska (np. suszenie osadów ściekowych, osuszanie powietrza w instalacjach klimatyzacyjnych, przygotowanie paliw alternatywnych). W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania suszarnictwem spowodowany rosnącymi wymaganiami dotyczącymi jakości produktu, wymaganiami związanymi z precyzyjną kontrolą procesu, potrzebą optymalizacji procesu pod kątem zużycia energii, zaostrzeniem norm ochrony środowiska i norm bezpieczeństwa, a także rozwojem i dostępnością nowych technologii. Zastosowanie nowoczesnych układów, w miejsce tradycyjnych rozwiązań, umożliwi obniżenie energochłonności procesu, poprawę warunków jego realizacji i zmniejszenie oddziaływania na środowisko.

Proces suszenia realizowany z otwartym obiegiem powietrza suszącego i/lub oparty na zjawisku parowania wody w temperaturze minimum  $100^{\circ}\text{C}$  jest energochłonny i przyczynia się do znacznego obciążenia środowiska. Istotnym problemem tych rozwiązań jest również emisja zanieczyszczeń i często uciążliwych zapachów do otoczenia (np. w procesie suszenia osadów ściekowych). W przypadku instalacji, które działają z otwartym obiegiem powietrza suszącego, zwłaszcza niskotemperaturowych rozwiązań (takich jak np. suszarnia powietrzna, w której materiał suszony (osad ściekowy) w sposób ciągły przedmuchiwany jest strumieniem powietrza atmosferycznego), proces suszenia uzależniony jest od panujących warunków atmosferycznych (otoczenia). W okresie letnim, przy wysokich temperaturach powietrza zewnętrznego, ale i wysokich wilgotnościach względnych, proces suszenia pomimo dużych ilości przedmuchiwanego powietrza jest mało sprawny. Podobnie dzieje się przy zbyt niskich temperaturach powietrza zewnętrznego, gdy podgrzanie go wymaga znacznych ilości energii. Rozwiązaniem uniezależniającym warunki realizacji procesu od warunków klimatycznych (otoczenia), mogącym zapewnić efektywną realizację procesu suszenia, może być suszenie z wykorzystaniem rekuperacji energii w układzie pompy ciepła uzdatniającej powietrze suszące, które cyrkuluje w zamkniętym obiegu.

## 2. Termodynamika procesu suszenia

Omawiając podstawy teoretyczne suszarnictwa, Kneule [16] definiuje suszenie jako proces usuwania wilgoci przez odparowanie, który z reguły uwarunkowany jest doprowadzeniem energii cieplnej. Podkreśla przy tym, że charakterystyczną cechą procesu suszenia jest jednoczesność wymiany ciepła i masy. W najbardziej typowym procesie suszenia konwekcyjnego, płynący nad wilgotnym materiałem strumień powietrza oddaje energię cieplną cieczy, która parując, jednocześnie przenika do strumienia powietrza suszącego. Zdolność (potencjał) powietrza suszącego do absorbowania wilgoci z materiału suszonego, czyli jak podają Voronjec i Antonijević [29] tzw. potencjał suszenia, zależy od stanu termicznego powietrza. Aby określić stan termiczny powietrza wilgotnego, które jest jednorodną mieszaniną powietrza suchego oraz zawartej w nim pary wodnej, a także wilgoci w postaci mgły wodnej [20], trzeba znać jego dwa parametry (np. temperaturę według termometru suchego i ciśnienie) oraz skład (np. zawartość wilgoci).

Zawartość wilgoci w dowolnej postaci w powietrzu wilgotnym można określić stosunkiem zwanym wilgotnością bezwzględną  $x$ :

$$x = \frac{m_w}{m_g} \quad [\text{gramów wilgoci} / 1 \text{ kg powietrza suchego}] \quad (1)$$

Wyraża on ilość wilgoci w gramach  $m_w$  przypadającą na 1 [kg] powietrza suchego  $m_g$ . W powietrzu wilgotnym, przy danym ciśnieniu  $p$  i temperaturze  $T$  może występować tylko ograniczona zawartość wilgoci w postaci pary wodnej.

Skład powietrza wilgotnego pod względem stopnia zawilżenia charakteryzuje także wilgotność względna powietrza  $\varphi$ , która oznacza stosunek gęstości pary wodnej  $\rho_w$  zawartej w powietrzu wilgotnym do maksymalnie możliwej gęstości pary wodnej w stanie nasycenia  $\rho_{w,n}$  przy tym samym ciśnieniu całkowitym  $p$  i tej samej temperaturze  $T$ :

$$\varphi = \left( \frac{\rho_w}{\rho_{w,n}} \right)_{p,T} \quad (2)$$

Dla powietrza wilgotnego, które może być traktowane jako mieszanina podlegająca prawom gazu doskonałego [20] wilgotność względna powietrza  $\varphi$  może być również wyrażona jako stosunek ciśnienia cząstkowego pary wodnej  $p_w$  do ciśnienia cząstkowego pary wodnej w stanie nasycenia  $p_{w,n}$ :

$$\varphi = \frac{\rho_w}{\rho_{w,n}} \cong \frac{p_w}{p_{w,n}} \quad (3)$$

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu  $p_w$  w danej temperaturze jest natomiast funkcją ciśnienia całkowitego powietrza  $p$  i zawartości wilgoci  $x$  w postaci pary wodnej zgodnie z równaniem:

$$p_w = p \frac{x}{0,622 + x} \quad (4)$$

Jak wspomniano wyżej, proces suszenia cechuje jednoczesność wymiany ciepła i masy. Siłą napędową wymiany ciepła jest gradient temperatury, natomiast siłą napędową wymiany masy (dyfuzji pary wodnej do suszącego powietrza) jest gradient ciśnienia cząstkowego pary pomiędzy materiałem suszonym a otaczającym medium ([16, 17, 28]). Materiał suszony będzie oddawał wilgoć dotąd, aż ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu suszącym  $p_w$  nie zrówna się z ciśnieniem cząstkowym pary  $p_p$  we wnętrzu jego porów. W praktyce oznacza to, iż proces suszenia zależy od temperatury, jak również od wilgotności względnej powietrza procesowego. Efekt suszenia materiału można więc uzyskać, odpowiednio podnosząc temperaturę powietrza suszącego  $t$  albo wystarczająco obniżając zawartość wilgoci  $x$  w powietrzu wchodzącym do komory suszenia. Do zewnętrznych warunków suszenia, mających wpływ na szybkość procesu, należy również zaliczyć prędkość przepływu powietrza suszącego względem suszonego materiału.

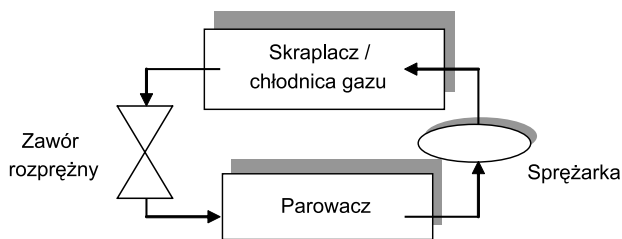
W konwencjonalnych suszarkach potencjał suszenia powietrza suszącego jest zwiększany poprzez podnoszenie jego temperatury na wejściu do suszarki, co w efekcie determinuje jego wilgotność względną. Alternatywą, w oparciu o powyższe rozważania, jest obniżanie

zawartości wilgoci w powietrzu (odwilżanie) przed podaniem do komory suszenia, co umożliwi realizację procesu przy stosunkowo niskiej temperaturze powietrza suszącego. Jest to możliwe w suszarkach pracujących w oparciu o pompę ciepła. Zaletą takich rozwiązań, co podkreśla Hawlader i inni [12], jest fakt, że wilgotność względna, od której zależy potencjał suszenia, może być kontrolowana niezależnie od temperatury.

### 3. Zasada działania urządzeń suszących z pompą ciepła

Pompa ciepła to urządzenie, które realizuje obieg lewobieżny, czyli jak podaje Królicki [18], obieg utworzony w ciągu przemian przebiegających w układzie współrzędnych w kierunku przeciwnym do prawobieżnego ruchu wskazówek zegara. Dzięki temu urządzenie to umożliwia wykorzystanie ciepła ze źródła o niskiej temperaturze do wytwarzania ciepła o wyższej temperaturze. Zamierzonym efektem obiegu pompy ciepła jest odprowadzenie energii cieplnej o wyższym potencjale, co pozwala na jej użyteczne wykorzystanie. Aby nastąpiło przekazanie energii cieplnej od ciała o niższej temperaturze do ciała o temperaturze wyższej czy podniesienie potencjału cieplnego ciała, musi być wykonana praca mechaniczna lub zrealizowany inny proces równoważny pod względem zdolności do wykonywania pracy [18]. Uzyskanie efektu grzania, czyli realizacja obiegu pompy ciepła, wymaga więc doprowadzenia energii z zewnątrz, zgodnie z drugą zasadą termodynamiki [31].

Pompa ciepła składa się zazwyczaj z czterech głównych elementów: (1) parowacz, (2) sprężarka, (3) skraplacz/chłodnica gazu i (4) zawór rozprężny (rys. 1). Czynnik chłodniczy, krążący w układzie pompy ciepła, zmienia swój stan skupienia z ciekłego na gazowy (odparowuje) wykorzystując ciepło dolnego źródła ciepła. Następnie realizując lewobieżny obieg termodynamiczny, przechodzi przez sprężarkę, do skraplacza (lub chłodnicy gazu, jeśli obieg jest transkrytyczny), gdzie oddaje ciepło do górnego źródła ciepła. Ciepło to jest efektem działania pompy ciepła.



Rys. 1. Schemat pompy ciepła

Fig. 1. Schematic view of the heat pump

Efektywność energetyczną pompy ciepła (ang. COP – *Coefficient of Performance*) definiuje się jako stosunek ilości uzyskanego ciepła do pracy obiegu grzejnego. Zgodnie z zasadami termodynamiki najwyższą efektywnością charakteryzuje się pompa ciepła z obiegiem Carnota. Każda inna pompa ciepła z powodu strat energii na tarcie itp. oraz określonych różnic temperatur przy wymianie ciepła między ośrodkami lub strumieniami ma efektywność niższą od teoretycznej efektywności cyklu Carnota [31].

Schmidt i in. [23] podkreślają, że zastosowanie pompy ciepła w konwekcyjnych układach suszenia jest okazją do wykorzystania jej szczególnych możliwości. Zdolność ziębienia pompy ciepła może być wykorzystana do odwilżenia powietrza procesowego, wychodzącego z komory suszenia, natomiast zdolność grzania może mieć zastosowanie przy ponownym podnoszeniu temperatury odwilżonego i oziębionego powietrza, które wraca do komory suszenia. Odzysk ciepła z zastosowaniem pompy ciepła jest jedną z metod obniżenia energochłonności procesu suszenia w suszarkach konwekcyjnych [31].

Możliwość obniżenia wilgotności względnej czynnika suszącego przed podaniem do komory suszenia oraz możliwość odzyskania ciepła utajonego z wilgotnych gazów odlotowych z suszarki wpływa na znaczące zainteresowanie wykorzystaniem pomp ciepła w suszarnictwie [12]. Strommen i Jonassen [27] podkreślają, że jest to technologia przyjazna środowisku ze względu na zredukowane zapotrzebowanie na energię do procesu suszenia, a także ze względu na realizację suszenia w zamkniętym obiegu powietrza. Zaletą zauważaną przez wielu autorów, w tym Hawladera i in. [12] jest uniezależnienie procesu suszenia od warunków zewnętrznych oraz możliwość kontrolowania temperatury i wilgotności powietrza suszącego.

Jak wynika z przeglądu literatury, pompy ciepła znalazły zastosowanie w technologii suszenia i zyskały popularność zwłaszcza w domowych suszarkach do bielizny ([15, 23]) oraz w suszeniu drewna i żywności [27]. W literaturze można też znaleźć informacje na temat wykorzystania pomp ciepła w technologii suszenia osadów ściekowych ([9, 10, 30]).

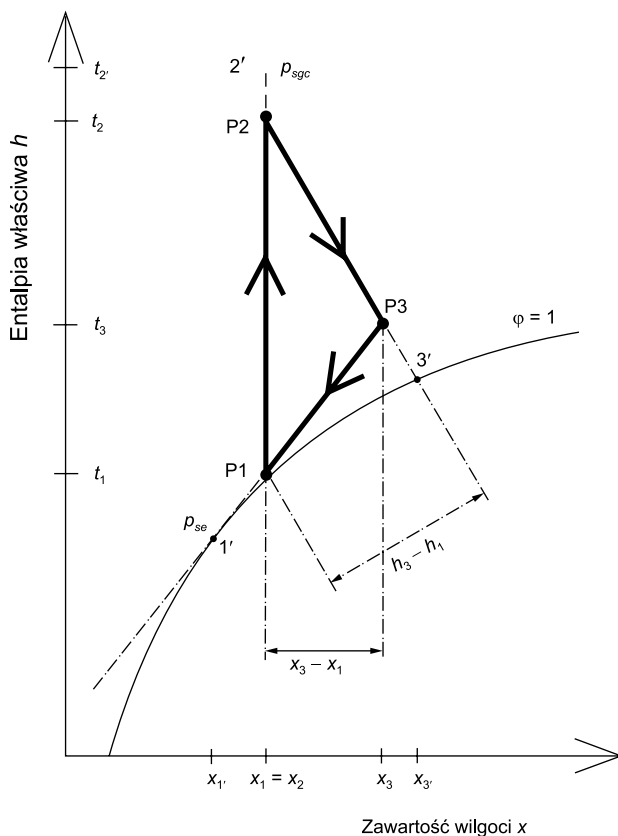
#### 4. Podstawowe założenia modelu procesu suszenia w oparciu o pompę ciepła

Zmiany stanu powietrza procesowego, krążącego w zamkniętym systemie suszenia współpracującym z pompą ciepła, przedstawione zostały na rys. 2.

Oziębione i odwilżone powietrze cyrkulacyjne dopływa do skraplacza pompy ciepła w punkcie  $P_1$ . W wymienniku tym podgrzewa się do temperatury  $t_2$ , przy jednoczesnym obniżaniu temperatury ziębnika krążącego w obiegu pompy ciepła. Proces ogrzewania powietrza obrazuje odcinek  $P_1 - P_2$ . Podgrzane powietrze o stanie  $P_2$  podawane jest do komory suszenia, w której, według założeń upraszczających, podlega adiabatycznemu nawilżeniu ( $h_2 = h_3$ ), absorbując odparowaną z suszonego materiału wilgość. Nawilżone powietrze o stanie  $P_3$  i zawartości wilgoci  $x_3$ , po wyjściu z komory suszenia przechodzi przez parowacz pompy ciepła, gdzie zostaje oziębione i odwilżone (do zawartości wilgoci  $x_2$ ). Wykroplona z powietrza cyrkulacyjnego wilgość jest magazynowana, a następnie usuwana z procesu suszenia. Wypływające z parowacza powietrze cyrkulacyjne podawane jest z powrotem do skraplacza, w celu ponownego ogrzania, co zamyka pętlę cyrkulacji powietrza.

Opisany wyżej proces jest, jak wspomniano, porównawczym procesem idealnym. W rzeczywistości występują straty ciepła z komory suszenia, których efektem jest różnica (obniżenie) entalpii pomiędzy punktem  $P_2$  i  $P_3$ . Z drugiej strony, prowadzenie procesu w sposób ciągły wiąże się z tym, że zyski ciepła w obiegu pompy ciepła przewyższają straty ciepła, co skutkuje wzrostem temperatury powietrza w komorze suszenia. Rozpatrując sumarycznie te zjawiska, można w przybliżeniu założyć, że efekt strat ciepła z komory suszenia oraz wzrostu temperatury powietrza suszącego będą się w pewnym momencie równoważyć i dla-

tego można przedstawiać przemiany powietrza cyrkulacyjnego w sposób uproszczony według obiegu porównawczego, tak jak to zostało zrobione na rys. 2. W praktyce stosuje się również dodatkowy wymiennik ciepła, który odbiera ewentualne nadwyżki ciepła z procesu.



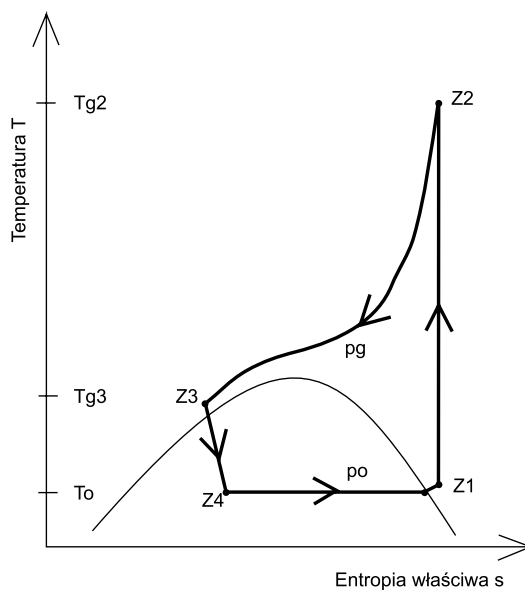
Rys. 2. Przemiany powietrza cyrkulacyjnego na wykresie  $h-x$  ( $h$  – entalpia właściwa [kJ/kg],  $x$  – zawartość wilgoci [g<sub>w</sub>/kg])

Fig. 2. The air cycle on  $h-x$  chart ( $h$  – specific enthalpy [kJ/kg],  $x$  – specific humidity [g<sub>w</sub>/kg])

Mając na uwadze problem globalnego ocieplenia, Wspólnota Europejska dąży do możliwie szybkiej realizacji zaleceń Protokołu z Kioto (ograniczenia antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych), konsekwentnie wprowadzając nowe rygory prawne, obejmujące kolejne grupy czynników chłodniczych. Podjęto już decyzję o wycofaniu z obiegu czynników z grupy HCFC i HFC, z uwagi na ich wysoki wpływ na efekt cieplarniany. Zgodnie z dyrektywą 2006/40/WE [33] z dnia 17 maja 2006 r., dotyczącą emisji z systemów klimatyzacji w pojazdach silnikowych, w nowych modelach samochodów do końca 2011 roku należy wyeliminować gazy HFC o współczynniku GWP większym niż 150, a we wszystkich rodzajach pojazdów do końca 2017 roku. W świetle zaostrzających się regulacji prawnych istotnym zagadnieniem staje się więc zastosowanie w pompach ciepła, w tym również współpracują-

cych z systemami suszenia, naturalnych czynników ziębnych. Dla porównania stosowany obecnie w niektórych pompach ciepła w suszarnictwie R404A ma wskaźnik GWP 25 razy większy od określonego jako dopuszczalny w dyrektywie 2006/40/WE, a popularny R134a ponad 8 razy przekracza ustanowioną jako granicę wartość 150.

Dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) jako ekologiczny czynnik ziębny oznaczany skrótem R744 znajduje coraz szersze zastosowanie w przemyśle ze względu na bezpieczeństwo i ochronę środowiska, jakich nie zapewniają inne, powszechnie używane syntetyczne czynniki ziębne [13]. Jest substancją bezwoną, chemicznie obojętną względem metali, nie rozpuszcza się w olejach mineralnych. Jest nietrujący, niepalny i niewybuchowy. Posiada korzystne właściwości termodynamiczne. Stosowany był powszechnie jako czynnik ziębny już pod koniec XIX wieku, jednakże w latach 30. XX wieku został wyparty przez ziębny z grupy CFC [4]. Zainteresowanie dwutlenkiem węgla, jako ekologicznym ziębnikiem, obudzili ponownie Lorentzem i Pettersen [19] w latach 90. XX wieku, wskazując na jego potencjał w rozwiązywaniu problemu niszczenia warstwy ozonowej i globalnego ocieplenia. W ostatniej dekadzie, zainteresowanie dwutlenkiem węgla gwałtownie wzrosło; jak podkreśla Auracher [1] stary czynnik chłodniczy stał się nową gwiazdą pośród substancji stosowanych w chłodnictwie. Przyczynił się do tego w znacznym stopniu rozwój wiedzy pozwalającej w pełni wykorzystać zalety dwutlenku węgla.



Rys. 3. Transkrytyczny obieg dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) w układzie  $T-s$  ( $T$  – temperatura [K],  $s$  – entropia właściwa [kJ/kgK])

Fig. 3. The air cycle on T-s chart ( $T$  – temperature [K],  $s$  – specific enthalpy [kJ/kgK])

Zastosowanie w pompie ciepła naturalnego ziębnika, jakim jest dwutlenek węgla, nie tylko pozwala na likwidację bezpośredniego wpływu instalacji na powstawanie efektu cieplarnianego, ale również wiąże się z wysoką temperaturą gazu sprężonego na wlocie do



chłodnicy, co jest dodatkową zaletą w tym układzie. Własności termofizyczne i charakterystyki dwutlenku węgla są bowiem inne od własności czynników ziębniczych dotychczas powszechnie stosowanych w obiegach lewobieźnych ([15, 24]). Podstawową różnicą w budowie urządzeń z wykorzystaniem  $\text{CO}_2$  jako czynnika ziębniczego jest wysokie ciśnienie robocze (na wyjściu ze sprężarki może sięgać 14 MPa) i niska temperatura punktu krytycznego. Z drugiej strony duża wartość właściwej objętościowej wydajności ziębienia  $\text{CO}_2$  pozwala na zmniejszenie ilości gazu krążącego w instalacji, a tym samym ograniczenie średnic przewodów i gabarytów sprężarki. Wysokie ciśnienie działa więc w efekcie na wnętrza przewodów o małych średnicach, co sprawia, że siły powstające w instalacji nie wykraczają poza wartości dopuszczalne. Sprężarka wchodząca w skład obiegu z  $\text{CO}_2$  wymaga jednak wzmocnionej konstrukcji o grubszych ściankach [11].

Tradycyjny obieg ziębniczy składa się z czterech głównych elementów: parowacza, sprężarki, skraplacza i elementu rozprężnego. Zastosowanie w pompie ciepła dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) jako czynnika ziębniczego sprawia, że termodynamiczne procesy obiegu lewobieźnego będą realizowane według obiegu transkrytycznego. Oznacza to, że parametry  $\text{CO}_2$  będą przechodzić przez punkt krytyczny, który dla  $\text{CO}_2$  występuje przy temperaturze  $T_c = 304,13 \text{ K}$  i ciśnieniu  $p_c = 7,38 \text{ MPa}$  [26]. W części obiegu związanej z odparowaniem ziębnika parametry będą znajdowały się poniżej punktu krytycznego, a w części związanej z odbieraniem ciepła od sprężonego ziębnika parametry będą leżały powyżej punktu krytycznego. Dwutlenek węgla pracujący pod ciśnieniem nadkrytycznym nie ulega skropleniu. Proces odbierania ciepła od sprężonego ziębnika w obiegu transkrytycznym zachodzi w obszarze jednofazowym. W rezultacie nie można w takim obiegu zastosować konwencjonalnego skraplacza z tradycyjnego obiegu lewobieźnego [13]. Funkcję skraplacza w obiegu transkrytycznym przejmuje chłodnica gazu [6].

Odwzorowanie transkrytycznego lewobieźnego obiegu  $\text{CO}_2$  w układzie temperatura–entropia właściwa obrazuje rys. 3. W obiegu tym można wydzielić następujące procesy:  $Z_1 - Z_2$  sprężanie izentropowe  $\text{CO}_2$ ;  $Z_2 - Z_3$  nadkrytyczne, izobaryczne ochładzanie  $\text{CO}_2$ ;  $Z_3 - Z_4$  dławienie izentalpowe  $\text{CO}_2$  od ciśnienia w chłodnicy gazu  $p_g$  do ciśnienia parowania  $p_o$ ;  $Z_4 - Z_1$  parowanie  $\text{CO}_2$  oraz przeżarcie pary ziębnika.

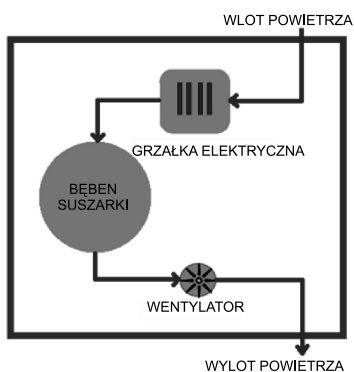
## 5. Pompa ciepła w domowych suszarkach bębnowych

Tradycyjnie suszenie ubrań odbywało się jedynie przy udziale promieniowania słonecznego oraz wiatru. Obecnie coraz bardziej popularne w gospodarstwach domowych stają się suszarki do bielizny funkcjonujące jako samodzielne urządzenia lub też jako pralkosuszarki. Suszarki do bielizny to urządzenia wykorzystujące energię zewnętrzną do podgrzania czynnika suszącego wilgotne tekstylia po procesie prania. Jest to szybki i wygodny sposób suszenia prania, zwłaszcza w sytuacji, gdy nie ma możliwości suszenia na otwartym powietrzu. Integralną częścią większości suszarek jest obrotowy bęben, przez który cyrkuluje powietrze suszące, penetrując materiał suszony i odbierając od niego wilgoć.

Pierwszymi domowymi suszarkami do bielizny były bębnowe suszarki wentylacyjne (wywiewowe, ewakuacyjne), w których strumień podgrzanego grzałką elektryczną powietrza suszącego kierowany był do wnętrza bębna, a następnie na zewnątrz budynku poprzez

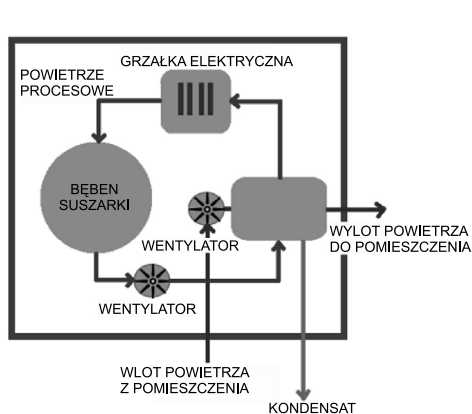


wentylację (rys. 4). Wysokie zużycie energii przez ten typ suszarek doprowadziło do poszukiwania nowych rozwiązań. Z uwagi na to, że większość strat energii stanowiły straty związane z wywiewaną z bębna suszarki mieszaniną powietrza i pary wodnej [7], próby ograniczenia energochłonności urządzeń skupiły się na odzysku energii z tego właśnie źródła. Realizowane były poprzez zamknięcie obiegu powietrza suszającego i wprowadzenie wymiennika ciepła, który powietrzem z otoczenia miał chłodzić wilgotne powietrze suszące oraz wykraplać z niego wilgoć (rys. 5). W ten sposób powstały suszarki kondensacyjne, działające w układzie zamkniętym (a właściwie prawie zamkniętym ze względu na nieszczelności) z odwilżaniem powietrza procesowego. Bansal i in. [2] porównując efektywność elektrycznych suszarek wentylacyjnych i kondensacyjnych, określili, że po zastosowaniu wymiennika ciepła, sprawność suszarki podniosła się o około 7%. Jednak pomimo tego, suszarki dalej nie spełniały niektórych europejskich standardów efektywności energetycznej.



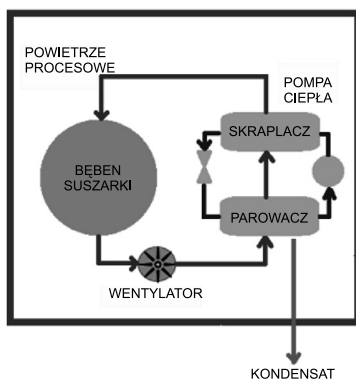
Rys. 4. Schemat suszarki wentylacyjnej

Fig. 4. Schematic view of the vented dryer



Rys. 5. Schemat suszarki kondensacyjnej

Fig. 5. Schematic view of the condensing dryer



Rys. 6. Schemat suszarki z pompą ciepła

Fig. 6. Schematic view of the heat pump dryer

Kolejną generację suszarek reprezentowały już suszarki z pompą ciepła. W urządzeniach tych, w porównaniu do suszarek kondensacyjnych, grzałka elektryczna oraz wymiennik ciepła zastąpione zostały obiegiem chłodniczym pompy ciepła (rys. 6). Zastosowanie pompy ciepła w urządzeniu do suszenia bielizny pozwoliło na znaczne oszczędności energetyczne, uniezależnienie procesu od warunków zewnętrznych oraz hermetyzację procesu, eliminując emisję wilgoci do otoczenia. W systemie tym zdolność ziębienia układu pompy ciepła wykorzystywana jest do odwilżenia powietrza procesowego, wychodzącego z bębna suszarki, natomiast zdolność grzania ma zastosowanie przy ponownym podnoszeniu temperatury odwilżonego i ochłodzonego powietrza, które wraca do komory suszenia. Idea ta jest relatywnie nowa i staje się coraz bardziej popularna, a także zaawansowana w zakresie obniżenia energochłonności, zwiększenia wydajności oraz minimalizacji rozmiarów urządzeń.

Analizowany na rys. 2 proces pomiędzy punktem  $P_3$  i  $P_1$  jest podobny dla suszarek z pompą ciepła i suszarek kondensacyjnych, z tą różnicą, że w suszarkach kondensacyjnych powietrze procesowe jest chłodzone powietrzem z pomieszczenia, natomiast w suszarkach z pompą ciepła ciepło odbiera krążący w obiegu pompy ciepła czynnik ziębiczny, który po zrealizowaniu obiegu lewobieżnego, oddaje ciepło z powrotem do powietrza suszącego podczas przepływu przez skraplacz. W suszarkach wentylacyjnych nie ma powiązania pomiędzy punktem  $P_3$  i  $P_1$ , ponieważ powietrze po procesie suszenia jest usuwane z układu.

Suszarka z pompą ciepła potrzebuje około połowę mniej energii elektrycznej w porównaniu do tradycyjnej suszarki kondensacyjnej [5]. Efektywność takiego urządzenia znacznie przekracza wytyczne Unii Europejskiej (Dyrektywa: 95/13/WE [32]) w zakresie przyznawania etykiety energetycznej A, podczas gdy suszarki wentylacyjne (wywiewowe) z trudem uzyskują klasę C.

Jeszcze do niedawna wszystkie dostępne domowe suszarki bębnowe były suszarkami klasy C. Obecnie na rynku można spotkać zarówno suszarki klasy B jak i suszarki klasy A wyposażone w pompę ciepła. Zastąpienie wszystkich suszarek bębnowych klasy C z Europejskich gospodarstw domowych, suszarkami zintegrowanymi z pompą ciepła, przyniosłoby oszczędności energii do 15 TWh rocznie. To odpowiadałoby unikniętej emisji około sześciu milionów ton dwutlenku węgla [5].

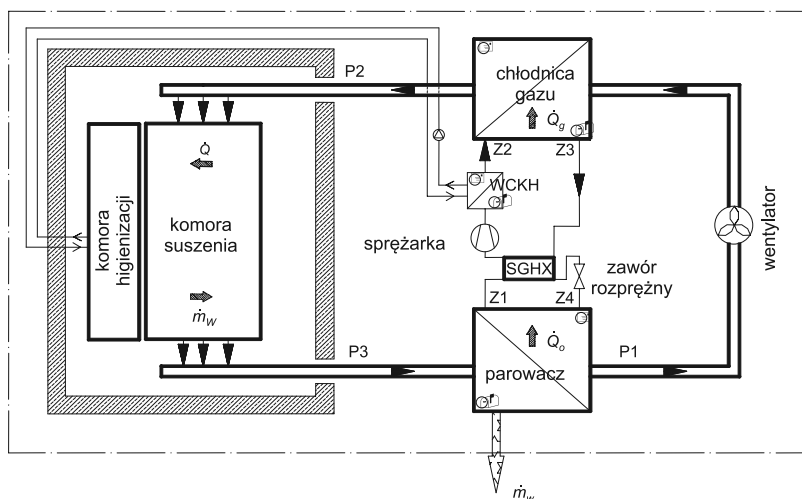
## **6. Koncepcja niskotemperaturowego system suszenia osadów ściekowych z wykorzystaniem pompy ciepła**

Osady ściekowe są nierozłącznie związane z działaniem każdej oczyszczalni ścieków. Powstają w procesach mechanicznego, biologicznego czy chemicznego usuwania zanieczyszczeń. Są trudnym w zagospodarowaniu odpadem z uwagi na wysoki stopień uwodnienia, znaczną zawartość związków organicznych (powodujących zagniwanie), obecność metali ciężkich i organicznych substancji niebezpiecznych, a także zagrożenie sanitarne wynikające z obecności bakterii, robaków pasożytniczych, wirusów, grzybów i innych mikroorganizmów. Ze względu na wysokie uwodnienie osadów ściekowych istotnym elementem ich dalszego wykorzystania, zwłaszcza w celach energetycznych, są procesy usuwania wody, w tym proces suszenia osadów. Osady bowiem, pomimo znacznej zawartości substancji organicznych, dają się spalać bez paliwa wspomagającego tylko wtedy, gdy są odpowiednio

wysuszone. Podobnie jest w przypadku pochodzących z odpadów paliw o niskiej kaloryczności i wysokiej zawartości wilgoci [21].

Autorzy poruszający temat suszenia osadów [3] oprócz sporych kosztów suszenia i dużego zapotrzebowania na energię do przeprowadzenia procesu, zwracają też uwagę na inny problem związany z tym zagadnieniem, a mianowicie zagrożenie zapachami i niebezpieczeństwo zanieczyszczenia powietrza. Jest to związane z zanieczyszczeniem gazów odlotowych związkami lotnymi (m.in. amoniakiem, siarkowodorem, merkaptanami, formaldehydem), mikroorganizmami i pyłem.

Analizując problemy związane z tematem suszenia osadów ściekowych, Pająk i Wielgosiński [22] podają cechy i parametry, którym powinny odpowiadać współczesne instalacje suszenia osadów. Są to przede wszystkim: możliwie najniższy wskaźnik zużycia energii cieplnej niezbędnej dla odparowania 1 kg wody z suszonych osadów – który jest odzwierciedleniem sprawności cieplnej procesu suszenia jaką reprezentuje dany rodzaj konstrukcji suszarki, oraz związana z nim możliwość odzysku ciepła kondensatu. Podkreślają również, że instalacja suszenia powinna zapewniać możliwość higienizacji osadu.



Rys. 7. Koncepcja niskotemperaturowego systemu suszenia osadów z pompą ciepła *SGHX* – doziębiacz (Suction Gas Heat Exchanger); *WCKH* – wymiennik ciepła komory higienizacji

Fig. 7. Schematic view of the low-temperature heat pump sludge drying system *SGHX* – Suction Gas Heat Exchanger; *WCKH* – hygienization chamber heat exchanger

Niskotemperaturowe suszenie osadów ściekowych w układzie z pompą ciepła jest alternatywą dla tradycyjnego, wysokotemperaturowego i energochłonnego procesu suszenia konwekcyjnego. Zastosowanie pompy ciepła do procesu suszenia osadów ściekowych pozwala na oszczędności energetyczne oraz hermetyzację procesu, zapewniając ograniczenie emisji szkodliwych substancji do atmosfery i praktycznie likwidując wydzielanie odorów z układu suszenia. Ponadto prowadzenie procesu suszenia osadów w warunkach niskotemperaturowo-

wych pozbawione jest wad procesu wysokotemperaturowego, w tym, problemu spiekania osadów ściekowych. Schemat działania takiego układu do suszenia i higienizacji osadów ściekowych przedstawiony został na rys. 7.

W instalacji do suszenia współpracującej z pompą ciepła osady suszone są powietrzem, które uzdatniane jest w układzie pompy ciepła [8]. Ze względu na szczególny charakter dwutlenku węgla, zaproponowanego jako czynnik ziębniczy dla pompy ciepła, część ciepła o wyższej temperaturze może być wykorzystana w komorze higienizacji osadu osuszonego. Istotną zaletą układu z pompą ciepła pracującą z dwutlenkiem węgla jako czynnikiem ziębniczym, a więc funkcjonującą według obiegu transkrytycznego, jest bowiem możliwość higienizacji osadu wynikająca z wysokiej temperatury gazu sprężonego na wlocie do chłodnicy. Zastosowanie w pompie ciepła naturalnego ziębnika, jakim jest dwutlenek węgla nie tylko umożliwi higienizację, ale pozwala również na likwidację bezpośredniego wpływu instalacji na powstawanie efektu cieplarnianego, który byłby związany z zastosowaniem w tym systemie tradycyjnego ziębnika.

Porównanie różnych technologii suszenia pod względem energochłonności jest możliwe z wykorzystaniem wskaźnika SMER (*Specific Moisture Extraction Rate*). Wskaźnik SMER, wyrażany w [g<sub>w</sub>/kJ] lub odpowiednio w [kg<sub>w</sub>/kWh], podaje masę wilgoci usuniętej z suszonego materiału w stosunku do nakładu energii na ten cel [23]. W przypadku procesu suszenia z wykorzystaniem pompy ciepła wartość wskaźnika SMER wyraża stosunek masy wilgoci usuniętej z suszonego materiału do mocy sprężarki pracującej w układzie pompy ciepła [15]. Wskaźnik ten jest obliczany w następujący sposób:

$$SMER_{hp} = \frac{\Delta x_{3-1}}{\Delta h_{3-1}} \frac{\Delta h_{Z2-Z3}}{\Delta h_{Z1-Z2}} = \frac{\Delta x_{3-1}}{\Delta h_{3-1}} COP_h \quad (5)$$

$$COP_h = \frac{q_g}{l_t} = \frac{\Delta h_{Z2-Z3}}{\Delta h_{Z1-Z2}} = \frac{h_{Z2-Z3}}{h_{Z2} - h_{Z1}} \quad (6)$$

gdzie:

- $x$  – zawartość wilgoci w powietrzu [g/kg p.s.] (zgodnie z oznaczeniami na rys. 2),
- $h$  – entalpia właściwa [kJ/kg p.s.] (zgodnie z oznaczeniami na rys. 2 i 3),
- $\Delta h_{3-1} = \Delta h_{1-2}$ ; przy założeniu adiabatycznego procesu nawilżania powietrza w komorze suszenia.

Wartość wskaźnika  $SMER_{hp}$  analizowanego dla układu suszenia osadów ściekowych z pompą ciepła z ziębnikiem CO<sub>2</sub> wynosi od 2,62 do 3,26 [kg<sub>w</sub>/kWh] w zależności od sprawności izentropowej sprężania i konfiguracji pompy ciepła [25]. Wskaźnik ten można określić jako atrakcyjny w porównaniu z innymi technologiami obecnymi na rynku (np. dla dostępnych na rynku suszarek osadów ściekowych jest to wartość od 1,11 do 1,28 [kg<sub>w</sub>/kWh] [22], a dla opracowanej na początku lat 90. XX wieku technologii suszenia z pompą ciepła pracującą z freonem R404a źródła podają wartość 2,5 [kg<sub>w</sub>/kWh] ([14, 30]).

## 7. Wnioski

Zastosowanie pompy ciepła w urządzeniu do suszenia pozwala na znaczne oszczędności energetyczne, uniezależnienie procesu od warunków zewnętrznych oraz hermetyzację

procesu. Oszczędności energetyczne w suszarce współpracującej z pompą ciepła wynikają z możliwości wysokosprawnej rekuperacji ciepła w układzie pompy ciepła i realizacji suszenia w zamkniętym obiegu powietrza o kontrolowanej temperaturze oraz wilgotności.

Zaletą zastosowania w pompie ciepła dwutlenku węgla jako ekologicznego czynnika roboczego jest wysoka temperatura gazu sprężonego na wlocie do chłodnicy.

## Literatura

- [1] Auracher H., *Editorial. CO<sub>2</sub> as Working Fluid – Theory and Applications*, International Journal of Refrigeration, Vol. 28, 2005, 1135-1139.
- [2] Bansal P.K., Braun J.E., Groll E.A., *Improving the energy efficiency of conventional tumbler clothes drying systems*, International Journal of Energy Research, Vol. 25, 2001, 1315-1332.
- [3] Biń J.B., *Osady ściekowe. Teoria i praktyka*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
- [4] Brown J.S., Yana-Motta S.F., Domański P.A., *Comparative analysis of an automotive air conditioning systems operating with CO<sub>2</sub> and R134a*, International Journal of Refrigeration, Vol. 25, 2002, 19-32.
- [5] Bush E., Attali S., Brunner C.U., Niederberger A.A., *Topten – Best of Europe. How do best products perform and why aren't they sold across Europe?*, ECEEE 2007, Summer study – Saving energy – Just do it! ([http://www.eceee.org/conference\\_proceedings/eceee/2007/Panel\\_6](http://www.eceee.org/conference_proceedings/eceee/2007/Panel_6)).
- [6] Cecchinato L., Corradi M., Fornasieri E., Zamboni L., *Carbon dioxide as refrigerant for tap water heat pumps: A comparison with the traditional solution*, International Journal of Refrigeration, Vol. 28, 2005, 1250-1258.
- [7] Deans J., *The modeling of a domestic tumbler dryer*, Applied Thermal Engineering, Vol. 21, 2001, 977-990.
- [8] Flaga A., Schnotale J., *Carbon dioxide as a refrigerant in a sludge drying heat pump*, Materiały 22. Międzynar. Kongresu Chłodnictwa, Pekin 2007, International Institute of Refrigeration (IIR) 2007, ICR07-E2-210.
- [9] Flaga-Maryńczyk A., Schnotale J., *Suszenie osadów ściekowych w układzie z pompą ciepła pracującą z dwutlenkiem węgla jako czynnikiem chłodniczym*, III Kongres Inżynierii Środowiska, Lublin 2009, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, vol. 58, tom 1, pod redakcją J. Ozonka i M. Pawłowskiej, Komitet Inżynierii Środowiska PAN, Lublin 2009, 73-85.
- [10] Flaga-Maryńczyk A., Schnotale J., *A sludge drying heat pump with CO<sub>2</sub> and ammonia as natural refrigerants*, 7th International Conference on Compressors and Coolants: Compressors 2009, Słowacja, Papiernicka 2009, Materiały konferencyjne, IIR series: 2009-6, ISBN IIR Paris: 978-2-913149-73-1, Wyd. SZ CHKT, 90041 Rovinka, 2009, 125-132.
- [11] Groll E.A., Cohen R., *Review of Recent Research on the Use of CO<sub>2</sub> for Air Conditioning and Refrigeration*, Materiały konferencyjne The REHVA World Congress, Clima 2000/Napoli 2001 World Congress – Napoli (I), 15-18 September 2001, 1-15.
- [12] Hawlader M.N.A., Chou S.K., Chua K.J., *A heat pump assisted closed-loop tunnel drying*, Drying'96, Materiały X Międzynar. Sympozjum Suszarnictwa 1996 (IDS'96), Tom A, Wyd. Springer-Verlag, Londyn 1996, 455-462.
- [13] Hoffman R., *Perspektywy zastosowania dwutlenku węgla (R744)*, Technika chłodnicza i klimatyzacyjna, 2/2005, 79-81.

- [14] Kleska M., *Suszenie osadów w systemie Watromat*, Przegląd komunalny 1/2000, dodatek branżowy „Kierunki zagospodarowania osadów ściekowych”, 32-33.
- [15] Klöcker K., Schmidt E.L., Steimle F., *Carbon dioxide as a working fluid in drying heat pumps*, International Journal of Refrigeration Vol. 24, 2001, 100-107.
- [16] Kneule F., *Suszenie*, Arkady, Warszawa 1970.
- [17] Kowalski S.J., *Thermomechanics of drying processes*, Lecture notes in applied and computational mechanics, Vol. 8, Wyd. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003.
- [18] Królicki Z., *Termodynamiczne podstawy obniżania temperatury*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
- [19] Lorentzen G., Pettersen J., *New possibilities for non-CFC refrigeration*, Materiały konferencyjne International Symposium on Refrigeration (IIR), Energy, and Environment, Norwegia, Trondheim, 1992, 147-63.
- [20] Maczek K., Schnotale J., Skrzyniowska D., Sikorska-Bączek R., *Uzdatnianie powietrza w inżynierii środowiska dla celów wentylacji i klimatyzacji*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.
- [21] Marsh R., Celary V., Griffiths T., Williams K., *Assesing the feasibility of waste derived fuels with high moisture content*, Materiały 23 Międzynar. Konferencji nt. “Solid Waste Technology and Management”, USA, Philadelphia 2008, Journal of Solid Waste Technology and Management, ISSN 1091-8043, 78-87.
- [22] Pająk T., Wielgosiński G., *Współczesne technologie suszenia i spalania osadów ściekowych – kryteria i uwarunkowania wyboru technologii*, Materiały II Międzynarodowej XIII Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Nowe spojrzenie na osady ściekowe – odnawialne źródła energii”, pod redakcją G. Maliny, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2003, 491-500.
- [23] Schmidt E.L., Klöcker K., Flacke N., Steimle F., *Applying the transcritical CO<sub>2</sub> process to a drying heat pump*, International Journal of Refrigeration, Vol. 21, No 3., 1998, 202-211.
- [24] Schnotale J., *Transkrytyczne obiegi lewobieżne ziębiarek i pomp ciepła do zastosowań w inżynierii środowiska z CO<sub>2</sub> jako naturalnym czynnikiem ziębniczym*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2010.
- [25] Schnotale J., Flaga A., *Modelowanie parametrów pracy pompy ciepła działającej według lewobieżnego obiegu transkrytycznego z CO<sub>2</sub> w instalacji suszenia osadów ściekowych*, XXXVIII Dni Chłodnictwa – Konferencja Naukowo-Techniczna, Poznań, listopad 2006, Wyd. SYSTHERM Chłodnictwo i Klimatyzacja Sp. z o.o., Poznań 2006, 245-254.
- [26] Span R., Wagner W., *A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100K at pressures up to 800 MPa*, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 25, No. 6, 1996, 1509-1596.
- [27] Strommen I., Jonassen O., *Performance tests of a new 2-stage counter-current heat pump fluidized bed dryer*, Drying'96, Materiały X Międzynarodowego Sympozjum Suszarnictwa 1996 (IDS'96), Tom A, Wyd. Springer-Verlag, Londyn 1996, 563-568.
- [28] Strumiłło Cz., *Podstawy teorii i techniki suszenia*, WNT, Warszawa 1975.
- [29] Voronjec D., Antonijević D., *Moist air drying potential in convective drying processes*, Drying'96, Materiały X Międzynarodowego Sympozjum Suszarnictwa 1996 (IDS'96), Tom A, Wyd. Springer-Verlag, Londyn 1996, s. 221-228.
- [30] Wandrasz J., *Niskotemperaturowe suszenie osadów komunalnych oraz współspalanie wysuszonych osadów*, Materiały Seminarium Naukowo-Technicznego firmy Eko Euroc Sp. z o.o. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Jadwisin 2004, 43-65.

- [31] Żyła R.J., *Zastosowanie pomp ciepła w procesie suszenia*, Praca doktorska wykonana na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej, Łódź 1998.
- [32] 95/13/WE: Dyrektywa Komisji Wspólnot Europejskich 95/13/WE z dnia 23 maja 1995 r. wykonująca dyrektywę Rady 92/75/EWG w zakresie etykiet efektywności energetycznej suszarek bębnowych typu domowego.
- [33] 2006/40/WE: Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2006/40/WE z dnia 17 maja 2006 r. dotycząca emisji z systemów klimatyzacji oraz zmieniająca dyrektywę Rady 70/156/EWG.