



KATEDRA
BUDOWNICTWA OGÓLNEGO
I FIZYKI BUDOWLI

75 LAT
WYDZIAŁU
INŻYNIERII
ŁĄDOWEJ

Budownictwo i fizyka budowli



pod redakcją
Tomasza Kisilewicza



Kraków 2021

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO WYDAWNICTWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
Tomasz Kapecki

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO WYDAWNICTW NAUKOWYCH
Jacek Pietraszek

REDAKTOR SERII
Wydział Inżynierii Lądowej
Andrzej Winnicki

REDAKTOR PROWADZĄCY
Leszek Mikulski

RECENZENCI
Lech Lichołai
Henryk Nowak

SEKRETARZ SEKCJI
OPRACOWANIE REDAKCYJNE
Marta Wlazło

SKŁAD I ŁAMANIE
Anna Pawlik

PROJEKT OKŁADKI
Karolina Szafran

© Copyright by Politechnika Krakowska

ISBN 978-83-66531-70-3

Wydawnictwo PK, ul. Skarżyńskiego 1, 31-866 Kraków; tel. 12 628 37 25, fax 12 628 37 60
e-mail: wydawnictwo@pk.edu.pl www.wydawnictwo.pk.edu.pl
Adres do korespondencji: ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Druk i oprawę wykonano w Dziale Poligrafii Politechniki Krakowskiej.
Ark. wyd. 5,0.

Zam. 49/2021

Nakład 100 egz.

Cena zł 25,20 z VAT

SPIS TREŚCI

Tomasz Kisilewicz WPROWADZENIE	5
Katarzyna Nowak-Dzieszko WPŁYW WENTYLACJI I INFILTRACJI NA JAKOŚĆ POWIETRZA WEWNĘTRZNEGO W BUDYNKACH EDUKACYJNYCH	9
Anna Dudzińska WPŁYW PRZYJĘTEGO MODELU KOMFORTU NA OCENĘ WARUNKÓW W PRZEGRZEWANYM BUDYNKU PASYWNYM.....	29
Katarzyna Nowak, Małgorzata Rojewska-Warchał RODZAJ I WIELKOŚĆ PRZESZKLENIA A KOMFORT CIEPLNY W POMIESZCZENIACH BIUROWYCH	49
Ryszard Skiba WPŁYW ZAKOTWIEŃ TRZPIENIOWYCH NA PRACĘ STATYCZNĄ PŁYT ELEWACYJNYCH Z BETONU GRC	69

WPROWADZENIE

Niniejsza monografia została przygotowana przez pracowników Katedry Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli Politechniki Krakowskiej (L-4). W katedrze prowadzone są zajęcia dydaktyczne z siedemnastu różnych przedmiotów dla specjalności Budownictwo, Gospodarka Przestrzenna i Inżynieria Czystego Powietrza. To szerokie spektrum zajęć dydaktycznych jest wynikiem bardzo zróżnicowanych zainteresowań i tematyki badawczej, którą zajmują się pracownicy. Tradycyjnym obszarem badawczym katedry są problemy związane z trwałością i rewitalizacją budownictwa wielkopłytkowego, stanowiącego wciąż w Polsce istotny fragment substancji mieszkaniowej. Analizowane są zarówno aspekty wytrzymałościowe, jak i te związane z funkcją użytkową, jakością środowiska wewnętrznego, energochłonnością czy wpływem na środowisko zewnętrzne. Przedmiotem zainteresowań innych członków L-4 są aspekty konstrukcyjne obiektów żelbetowych, wzmacnianie konstrukcji istniejących oraz istotne w przypadku budownictwa przemysłowego problemy drgań i fundamentów pod maszyny. Swego rodzaju specjalizacją katedry są także projektowe, wykonawcze i badawcze problemy związane z warstwami okładzinowymi fasad wentylowanych. Odrębny tematycznie obszar pracy naukowej to zagadnienia fizyki budowli, związane głównie z aspektami ciepłno-wilgotnościowymi, budownictwem niskoenergetycznym, komfortem cieplnym oraz rozległym zakresem akustyki budowlanej. Ograniczenie zapotrzebowania na energię nowoczesnych budynków nie oznacza automatycznej poprawy warunków w pomieszczeniach. Jeśli znikają czy zmniejszają się problemy związane z niedograniem wnętrza, asymetrią promieniowania czy rozwarstwieniem termicznym, to coraz bardziej dotkliwe stają się kwestie związane z przegrzewaniem, izolacyjnością akustyczną czy zbyt wysokim stężeniem dwutlenku węgla i innymi zanieczyszczeniami powietrza wewnętrznego. Najnowszy wątek badań pracowników katedry jest właśnie związany z zanieczyszczeniem powietrza smogiem i propagacją tego zanieczyszczenia we wnętrzu budynku.

Tak szeroki zakres tematyczny badań prowadzonych w L-4 znajduje tylko w niewielkiej części swoje odbicie w prezentowanej monografii. Trzy spośród czterech rozdziałów niniejszej monografii są związane z fizyką budowli, natomiast rozdział czwarty dotyczy mechanicznych aspektów projektowania fasad z elewacją z betonu GRC (zbrojonego włóknem szklanym).

Autorka pierwszego rozdziału zwraca uwagę na jakość środowiska wewnętrznego w budynkach edukacyjnych z naturalną wentylacyjną wymianą powietrza, w aspekcie stężenia dwutlenku węgla oraz stężenia pyłów zawieszonych. Z jednej strony zwraca uwagę na sprzeczność związaną z minimalną wymaganą wymianą powietrza, pozwalającą na uzupełnianie stężenia tlenu, usuwaniem dwutlenku węgla i pary

wodnej, a z drugiej zaś z transmisją do wnętrza pyłów zawieszonych w powietrzu zewnętrznym. W badanych pomieszczeniach dydaktycznych naturalna wentylacja nie wystarcza do usuwania wysokiego stężenia dwutlenku węgla. Częściowo dzięki temu, nawet w okresach wysokiego stężenia cząstek zawieszonych w otoczeniu budynku, w pomieszczeniach stężenie tych cząstek jest akceptowalne.

W rozdziale drugim autorka analizuje warunki termiczne w budynku szkoły zaprojektowanej w standardzie budynku pasywnego. Poszukiwana jest odpowiedź na pytanie, czy skuteczna izolacja i wysoka szczelność budynku musi nieuchronnie prowadzić do stosowania skomplikowanych systemów mechanicznego chłodzenia, kosztownych sond gruntowych itp. Tego rodzaju budownictwo jest obecnie popularne na całym świecie i traktowane jako rozwiązanie redukujące fatalny wpływ użytkowania energii na środowisko zewnętrzne. Pierwsze doświadczenia z tego typu obiektami były jednak związane także z zastrzeżeniami dotyczącymi warunków letnich. Duży nacisk kładziony na minimalizację ogrzewania skutkowało bowiem okresowym przegrzewaniem wnętrza i istotnymi nakładami na usuwanie nadmiaru energii w tym okresie. Autorka analizowała wpływ stosowania różnych rozwiązań na eliminację lub zmniejszenie obciążenia wewnątrz zyskami cieplnymi w ciepłym okresie roku, ale także dokonała porównania dwóch modeli komfortu cieplnego. Skutki tego porównania są istotne dla praktyki projektowej. Model adaptacyjny komfortu cieplnego, zakładający większą możliwość przystosowania organizmu ludzkiego do warunków cieplnych oraz wpływ użytkowników na ubiór i sposób eksploatacji budynku, pozwala zaakceptować warunki odrzucane w przypadku klasycznego modelu Fanger'a. Idea naturalnej adaptacji do warunków letnich świetnie pasuje do aktualnego obecnie powrotu do możliwie prostych pasywnych rozwiązań w budownictwie.

W rozdziale trzecim autorki zajmują się wpływem rodzaju i wielkości okien na komfort cieplny w obficie przeszklonych obiektach biurowych. We współczesnych obiektach wielkość przeszkleń jest często wynikiem decyzji o charakterze estetycznym, a nie technicznym. Skutki tych decyzji to nieracjonalne zużycie energii, ale także długotrwałe i intensywne przegrzewanie wnętrza nie tylko w okresie letnim. Tymczasem projektant ma do dyspozycji szereg rozwiązań pozwalających na uniknięcie tych problemów. Analizując szczegółowo zagadnienie doboru rodzaju oszklenia i wielkości okien, autorki podkreślają znaczenie zintegrowanego projektowania budynków energooszczędnych. Ponieważ wszystkie decyzje projektowe wpływają później na wiele różnych sfer funkcjonowania budynku, to warto te decyzje uzgadniać w szerokim gronie projektantów w ramach tzw. projektowania zintegrowanego.

W ostatnim czasie liczne prace L-4 dotyczyły projektowania i badań fasad kamiennych, betonowych i szklanych. Ich kontynuacją jest realizowana przez mgr'a inż. Ryszarda Skibę praca doktorska, w której analizowany jest wpływ rodzaju zakotwień na naprężenia powstające w elewacyjnych płytach betonowych zbrojonych włóknem szklanym (GRC). Ze względu na zwiększoną wytrzymałość na zginanie i rozciąganie (w porównaniu do zwykłym betonem konstrukcyjnym) oraz stosunkowo

duże możliwości kształtowania geometrii płyt elewacyjnych beton staje się coraz popularniejszą alternatywą dla okładzin z kamienia naturalnego. Porównano wyniki obliczeń numerycznych dla kilku rodzajów stosowanych obecnie zamocowań w poszukiwaniu najkorzystniejszego rozwiązania. Na podstawie wykonanych analiz autor zaproponował płaski model obliczeniowy, ale sugeruje zastosowanie analiz trójwymiarowych w połączeniu z poprawną metodologią badań nośności doświadczalnych płyt elewacyjnych z GRC na przebicie. Poszukiwane są metody zamocowania zapewniające bezpieczeństwo użytkowania oraz wysoką trwałość elewacji z tego materiału.

Życzę ciekawej lektury oraz zachęcam do kontaktu i współpracy z pracownikami Katedry Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli.

Edytor
Tomasz Kisilewicz

Katarzyna Nowak-Dzieszko*

WPŁYW WENTYLACJI I INFILTRACJI NA JAKOŚĆ POWIETRZA WEWNĘTRZNEGO W BUDYNKACH EDUKACYJNYCH

INFLUENCE OF VENTILATION AND INFILTRATION ON INDOOR AIR QUALITY IN EDUCATIONAL BUILDINGS

STRESZCZENIE

W niniejszym rozdziale analizowana jest jakość środowiska wewnętrznego w budynkach edukacyjnych z naturalną wentylacyjną wymianą powietrza w aspekcie stężenia dwutlenku węgla oraz stężenia pyłów zawieszonych. Zwrócono uwagę na sprzeczność związaną z jednej strony z minimalną wymaganą wymianą powietrza, pozwalającą na uzupełnianie stężenia tlenu, usuwaniem dwutlenku węgla i pary wodnej, a z drugiej z transmisją do wnętrza pyłów zawieszonych w powietrzu zewnętrznym. W badanych i opisywanych pomieszczeniach dydaktycznych naturalna wentylacja nie wystarcza do obniżania w wymaganym stopniu wysokiego stężenia dwutlenku węgla. Pod tym względem nie spełnia więc koniecznych wymagań. Jednocześnie też, nawet w okresach wysokiego stężenia cząstek zawieszonych w otoczeniu budynku, dzięki ograniczonej wentylacji w pomieszczeniach stężenie cząstek PM10 i PM2,5 było akceptowalne.

Słowa kluczowe: pył zawieszony, szczelność, gaz śladowy, wentylacja, jakość powietrza

ABSTRACT

In this chapter, the quality of the internal environment in educational buildings with natural ventilation air exchange is analyzed in terms of carbon dioxide concentration and particulate matters (PM) concentration. Attention was drawn to a contradiction related, on the one hand, to the minimum required air exchange, allowing for the supplementation of oxygen concentration, removal of CO₂ and water vapor, and on the other hand, to the transmission of particles suspended in the outside air to the interior. In the tested and described teaching rooms, natural ventilation is not sufficient to reduce the high concentration of carbon dioxide to the required degree. In this respect, therefore, it does not meet the necessary requirements. At the same time, even in the periods of high concentration of suspended particles outside of the building, the concentration of PM10 and PM2.5 particles was acceptable due to the limited ventilation intensity in the rooms.

Keywords: particulate matter, tightness, tracing gas, ventilation, air quality

* Mgr inż. Katarzyna Nowak-Dzieszko, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, Politechniki Krakowska.

1. WSTĘP

Utrzymanie odpowiedniej jakości powietrza w pomieszczeniach edukacyjnych uznaje się za czynnik wpływający na poprawę wyników nauczania uczniów oraz studentów. W trakcie projektowania instalacji wentylacyjnej istotne jest przestrzeganie wymagań określonych w normach i przepisach, niestety okazuje się, że powszechnie użytkowane pomieszczenia z wentylacją grawitacyjną często nie spełniają wymagań dla tego typu budynków. W pracy dokonano analizy jakości powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach edukacyjnych budynku Politechniki Krakowskiej. W salach przeprowadzono długoterminowe pomiary stężenia pyłów zawieszonych PM (ang. *Particulate Matter*) na zewnątrz i wewnątrz, a także pomiary stężenia dwutlenku węgla wewnątrz. Dwutlenek węgla zastosowano również jako gaz wskaźnikowy do pomiaru intensywności wymiany powietrza. Przedstawiono wybrane wyniki tych badań oraz korelację występującą między stężeniami zewnętrznym i wewnętrznym pyłu zawieszzonego PM10 i PM2,5.

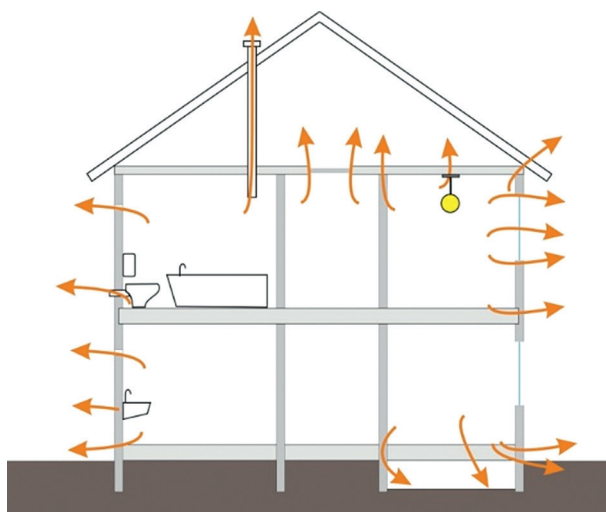
Kraków, miasto o wielkiej wartości historycznej i dawna stolica Polski, położone jest w bardzo dużej dolinie. Ta niekorzystna lokalizacja sprawia, że naturalna wentylacja miasta jest bardzo utrudniona i przez wiele dni w roku prędkość powietrza jest tutaj bardzo niska. Ze względu na szerokie wykorzystanie węgla do ogrzewania mieszkań i intensywny ruch miejski w historycznym centrum miasta emisja zanieczyszczeń jest wysoka, co powoduje wysokie stężenie pyłu atmosferycznego PM10 i PM2,5. Oczekuje się, że skuteczna wentylacja wnętrza budynku pozwala na utrzymanie dobrej jakości powietrza w pomieszczeniu, m.in. poprzez ograniczenie stężenia dwutlenku węgla, wilgotności powietrza, zanieczyszczenia chemicznego itp. Jednocześnie też w okresach bardzo wysokiego stężenia PM w atmosferze zamierzona wymiana powietrza może powodować skażenie wnętrza wysokim poziomem pyłów zawieszonych. W wyniku tej sprzeczności może pojawić się zalecenie ograniczenia wentylacyjnej wymiany powietrza w celu utrzymania wysokiej jakości powietrza wewnętrznego. Celem niniejszego rozdziału jest określenie wpływu wentylacji na jakość powietrza uwzględniającą jednocześnie stężenia pyłów zawieszonych oraz dwutlenku węgla.

2. WENTYLACJA I INFILTRACJA W BUDYNKACH

Wymiana powietrza między budynkiem a otoczeniem odbywa się przez system wentylacji oraz infiltrację i jest funkcją wielu zmiennych, takich jak lokalizacja i osłonięcie budynku, lokalizacja i wielkość nieszczelności w obudowie, budowa i sposób działania systemu wentylacyjnego, sposób użytkowania budynku, różnica temperatury między środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym czy prędkość i kierunek wiatru.

Ze względu na tak liczne zmienne opis i ocena rzeczywistej wymiany powietrza jest bardzo skomplikowanym zadaniem. Najtrudniejsze w opisie tego zjawiska jest uwzględnienie wpływu warunków klimatycznych, temperatury, kierunku i prędkości wiatru, które są zmienne w czasie.

Infiltracja to napływ powietrza do wnętrza przez nieszczelności, pęknięcia i inne niekontrolowane otwory w obudowie budynku (il. 1). Infiltracja jest szczególnie ważna w przypadku systemu wentylacji naturalnej, gdyż warunkuje ona prawidłowe działanie takiego systemu [4, 11].



Il. 1. Najczęstsze miejsca występowania nieszczelności w obudowie budynku.
Opracowanie aut.

Wentylacja naturalna jest wciąż najczęściej spotykanym rodzajem wentylacji w budynkach w Polsce. Dotyczy to również budynków edukacyjnych. Jej zaletą jest prosta budowa i niewielki koszt wykonania. Główne wady systemu wentylacji naturalnej to niska skuteczność działania oraz jej silna zależność nie od faktycznych potrzeb, ale od charakteru i wartości naturalnych sił wymuszających przepływ powietrza. W tym kontekście nieco zaskakujący może być fakt, że badania wykazują jednak większą satysfakcję użytkowników budynków z systemem wentylacji naturalnej w porównaniu z użytkownikami wentylacji mechanicznej [23].

3. JAKOŚĆ POWIETRZA W BUDYNKACH

System wentylacji wpływa na jakość powietrza oraz poziom stężenia szkodliwych pyłów zawieszonych wewnątrz budynków. W przypadku wentylacji grawitacyjnej mamy do czynienia z bezpośrednim napływem powietrza zewnętrznego do wnętrza pomieszczeń przez nieszczelności w obudowie budynku lub specjalne otwory nawiewne. Dlatego też poziom zanieczyszczenia powietrza zewnętrznego będzie wpływał na wartość stężenia zanieczyszczeń wewnątrz pomieszczeń. Jako że większość ludzi spędza w pomieszczeniach 80-90% czasu [7], to istotne jest zrozumienie mechanizmu transportu zanieczyszczeń pomiędzy wnętrzem i otoczeniem budynku.

Polska od lat boryka się z bardzo wysokim poziomem zanieczyszczenia powietrza pyłami zawieszonymi (smogiem) i kładziony jest ogromny nacisk społeczny na kontrolę poziomu stężeń zanieczyszczeń. W sposób ciągły pomiary wykonywane są w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ). Poza stacjami PMŚ powstają liczne inicjatywy prywatne i społeczne dążące do stworzenia sieci czujników jakości powietrza zewnętrznego.

Wymagania krajowe regulują wyłącznie poziomy dopuszczalne pyłów zawieszonych w powietrzu zewnętrznym [20]. W rozporządzeniu definiuje się poziomy stężenia pyłów, powyżej których o potencjalnym zagrożeniu informowane jest społeczeństwo. Nie istnieją żadne przepisy regulujące lub kontrolujące poziom stężenia pyłów w pomieszczeniach. W przypadku przekroczenia poziomu alarmowego na zewnątrz Główny Inspektorat Ochrony Środowiska zaleca bezwzględne ograniczenie aktywności na zewnątrz oraz pozostawanie w budynkach i nieotwieranie okien.

Na jakość powietrza wewnętrznego wpływa również poziom stężenia dwutlenku węgla w czasie użytkowania pomieszczeń. W pomieszczeniu zamkniętym może być ono nawet wielokrotnie wyższe niż w powietrzu zewnętrznym. W powietrzu zewnętrznym wynosi ono ok. 300-350 ppm (parts per milion – sposób wyrażania stężeń bardzo rozcieńczonych roztworów związków chemicznych, określający ile cząsteczek związku chemicznego przypada na 1 mln cząsteczek roztworu), w miastach i na obszarach przemysłowych 400 ppm.

Szacuje się, że dorosły człowiek podczas nieaktywnego odpoczynku wydziela ok. 200 ml dwutlenku węgla na 1 min, czyli 12 l na 1 h. Podczas dużego wysiłku fizycznego ilość wydzielanego dwutlenku węgla może wzrosnąć nawet 4-6-krotnie. Pośredni wpływ na emitowaną ilość dwutlenku węgla ma temperatura, gdyż w miarę jej wzrostu wzrasta częstotliwość oddechów [6].

Polskie prawodawstwo nie określa dopuszczalnych stężeń dwutlenku węgla w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi. Dozwolone stężenia określone są natomiast w przepisach innych krajów, np. w normie ASHRAE 62.1 [1] lub organizacji międzynarodowej WHO (ang. *World Health Organization*). Polskie przepisy poda-

ją jedynie informację o maksymalnej ekspozycji pracowników na stanowiskach pracy i definiują następujące wartości:

- NDS (najwyższe dopuszczalne stężenie) – wartość średnia ważona stężenia, którego oddziaływanie na pracownika w ciągu 8-godzinnego dobowego i przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy przez okres jego aktywności zawodowej nie powinno spowodować ujemnych zmian w jego stanie zdrowia i w stanie zdrowia jego przyszłych pokoleń;
- NDSCh (najwyższe dopuszczalne stężenie chwilowe) – wartość średnia stężenia, które nie powinno spowodować ujemnych zmian w stanie zdrowia pracownika, jeżeli występuje w środowisku pracy nie dłużej niż 15 min i nie częściej niż 2 razy w czasie zmiany roboczej, w odstępie czasu nie krótszym niż 1 h [20].

Przy wentylacji pomieszczeń, w których przebywają ludzie, do oceny warunków środowiskowych stosuje się pojęcie tzw. minimum higienicznego, określającego górną granicę stężenia dwutlenku węgla na poziomie 1000 ppm. Wartość ta jest jednak przyjmowana na podstawie wytycznych WHO, a nie polskich rozporządzeń. W celu utrzymania w pomieszczeniach stężenia dwutlenku węgla poniżej 1000 ppm, szczególnie w pomieszczeniach użytkowanych przez osoby wydychające ten gaz w warunkach podwyższonego stresu i dużego zagęszczenia, niezbędna jest właściwie funkcjonująca instalacja wentylacyjna, dostarczająca świeże powietrze w miejsce powietrza zużytego.

4. JAKOŚĆ POWIETRZA W BUDYMKACH EDUKACYJNYCH

W przypadku budynków szkolnych, przedszkolnych oraz przeznaczonych dla szkolnictwa wyższego, utrzymanie odpowiedniej jakości powietrza w pomieszczeniach uznaje się za czynnik wpływający na jakość wyników nauczania uczniów i studentów. Zbyt niskie stężenie tlenu może powodować uczucie duszności i bóle głowy, a w konsekwencji obniżać koncentrację i efektywność przyswajania wiedzy. W literaturze można znaleźć wiele badań, których wyniki tego dowodzą. Przegląd tych badań można znaleźć w artykułach [2, 12, 14]. Autorzy udowodnili, że podwyższone stężenie dwutlenku węgla wpływa negatywnie na przyswajanie wiedzy, dlatego przy projektowaniu wentylacji należy zwrócić szczególną uwagę na kontrolowanie tego stężenia. Badaniom poddawano różne grupy studentów i uczniów. Analizowano wyniki uzyskiwane w testach (matematycznych, czytanie ze zrozumieniem itp.) przy kontrolowanym stężeniu dwutlenku węgla w zakresie 600-5000 ppm (w zależności od badania). Wszyscy badacze są zgodni, że przy stężeniach powyżej 2000-3000 ppm wyniki uzyskiwane przez uczniów są znacząco gorsze w porównaniu z wynikami uzyskanymi przy stężeniach mniejszych od 1000 ppm. Na podstawie własnego przeglądu

literatury i badań autorzy [14] wyszczególnili skutki, jakie niesie za sobą określone stężenie dwutlenku węgla:

- 1000 ppm – maksimum higieniczne,
- 5000 ppm – poczucie zmęczenia, dyskomfort,
- 15 000 ppm – zaburzenia oddychania,
- 30 000 ppm – zawroty, bóle głowy,
- 50 000 ppm – utrudnione oddychanie, zaburzenia widzenia,
- 100 000 ppm – utrata przytomności.

Biorąc pod uwagę badania dotyczące korelacji wyników w nauce ze stężeniem dwutlenku węgla, oraz znając skutki podwyższonego stężenia dwutlenku węgla, należy stwierdzić, że parametr ten jest bardzo istotny dla budynków dydaktycznych i edukacyjnych, chociaż nie jest on normowany.

Według normy PN-B-03430 [17], która przez lata była stosowana w projektowaniu wielkości strumienia wentylacji, w pomieszczeniach budynków użyteczności publicznej przeznaczonych do stałego i czasowego pobytu ludzi wymagany strumień objętości powietrza zewnętrznego powinien wynosić co najmniej $20 \text{ m}^3/\text{h}$ na 1 os. Natomiast w przypadku pomieszczeń w przedszkolach oraz żłobkach, w których przebywają dzieci, norma dopuszcza obniżenie strumienia objętości powietrza do $15 \text{ m}^3/\text{h}$ dla każdego dziecka. Należy zwrócić uwagę, że w pomieszczeniach tych przebywają także osoby dorosłe sprawujące opiekę nad dziećmi, dla których strumień należy obliczać jako $20 \text{ m}^3/\text{h}$ na 1 os.

Przegląd wymagań stosowanych w innych krajach można znaleźć również w opracowaniu [12]. Szczegółowe wytyczne dostosowane do wieku użytkowników budynków edukacyjnych zawarte są m.in. w amerykańskich wytycznych ASHRAE 61.1 [1]. Znajdują się tam szczegółowe dane dotyczące wymaganego strumienia powietrza zewnętrznego. Projektowany strumień jest sumą strumienia przypadającego na 1 os. przebywającą w pomieszczeniu i związanego z aktywnością ludzi oraz strumienia związanego z materiałami budowlanymi i wyposażeniem pomieszczenia, obliczanego w zależności od jego powierzchni. Wytyczne dla pomieszczeń edukacyjnych przedstawiono poniżej:

- pomieszczenia żłobkowe (dla dzieci do lat 4) – $18 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{os.})$,
- klasy (dla dzieci w wieku 5-8 lat) – $18 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{os.})$,
- klasy (dla dzieci w wieku od 9 lat) – $18 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{os.})$,
- sale wykładowe – $13,4 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{os.})$.

Dopuszczalne poziomy stężenia dwutlenku węgla w budynkach użyteczności publicznej są także określone w normie PN-EN16798-1 [16]. Definiuje ona cztery kategorie jakości powietrza w zależności od poziomu stężenia dwutlenku węgla w pomieszczeniu. W tabeli 1 podane są wartości ponad 400 ppm, zakładanego jako poziom stężenia w powietrzu zewnętrznym.

Tabela 1

Kategorie jakości powietrza wewnętrznego w zależności od poziomu stężenia dwutlenku węgla [16]

Kategoria jakości powietrza wewnętrznego	Przyrost stężenia CO ₂ [ppm] powyżej wartości stężenia w powietrzu zewnętrznym [400 ppm]
Wysoka jakość powietrza	350
Średnia jakość powietrza	500
Umiarkowana jakość powietrza	800
Niska jakość powietrza	1200

5. POMIARY SPRAWNOŚCI WENTYLACJI METODĄ GAZU ŚLADOWEGO

Metoda gazu znacznikowego polega na wprowadzeniu do danej przestrzeni określonej ilości gazu jako znacznika i obserwacji zmiany jego stężenia w czasie. Dysponując odpowiednimi danymi na temat emisji i rozkładu stężenia gazu, można określić drogi przepływu powietrza, infiltracji oraz intensywność wentylacyjnej wymiany powietrza.

Metoda ta pozwala na określenie rzeczywistej wymiany powietrza pomiędzy środowiskami zewnętrznym a wewnętrznym w konkretnych warunkach naturalnej różnicy ciśnień. Na tę wymianę składa się wymiana powietrza wynikająca z działania systemu wentylacyjnego oraz infiltracja lub eksfiltracja powietrza przez obudowę budynku. Pomiar tego typu jest szczególnie ważny w przypadku budynków z wentylacją grawitacyjną, w których wartość strumienia wymienianego powietrza nie jest kontrolowana i zależy od warunków atmosferycznych.

Metody gazów znacznikowych wykorzystywane są w określaniu [9]:

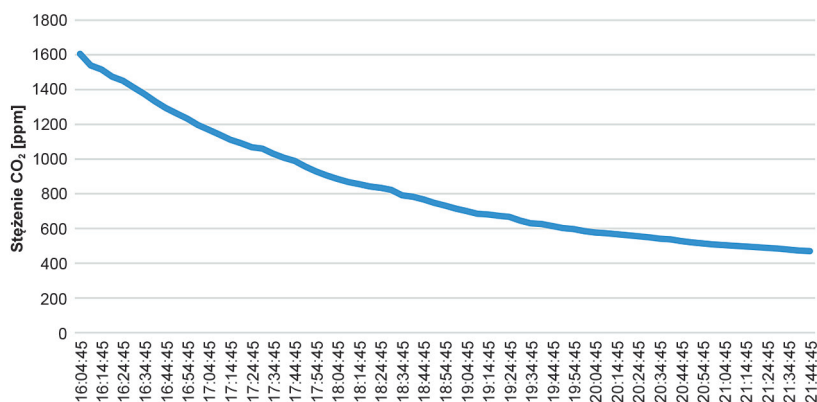
- 1) liczby wymian powietrza w pomieszczeniach,
- 2) rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń,
- 3) identyfikacji „krótkich spięć” w instalacjach wentylacyjnych,
- 4) skuteczności miejscowych odciągów powietrza,
- 5) międzystrefowych przepływów powietrza.

Metoda gazu znacznikowego została opisana w normie PN-EN 12569 [9]. Pomiar metodą gazu śladowego dostarcza informacji na temat rzeczywistej wymiany powietrza między środowiskami wewnętrznym i zewnętrznym oraz skuteczności wentylacji i infiltracji w budynku.

Wybór szczegółowej metody badania zależy od struktury budynku, rodzaju systemu wentylacyjnego, zastosowanego sprzętu. Stosowane są trzy różne metody pomiaru z wykorzystaniem gazu śladowego:

- 1) metoda zaniku gazu śladowego,
- 2) metoda stałej emisji gazu znacznikowego,
- 3) metoda stałego stężenia.

W metodzie zaniku gazu śladowego substancja rozpylana jest w pomieszczeniu jednorazowo. Po dokładnym wymieszaniu znacznika z powietrzem bada się zmianę jego stężenia w czasie. Jeżeli strumień powietrza przepływający przez pomieszczenie jest stały, wówczas stężenie gazu maleje wykładniczo w czasie. Przykładowy wykres zaniku stężenia dwutlenku węgla w czasie przedstawia il. 2.



Il. 2. Zanik stężenia gazu znacznikowego CO₂ w czasie w sali 11 (pomiar: 2.12.2019).
Opracowanie aut.

W metodzie stałej emisji gazu znacznikowego wprowadza się stałą objętość gazu znacznikowego i bada zmianę jego stężenia aż do uzyskania stanu ustalonego. Wadą tej metody jest z pewnością duże zużycie znacznika.

Metoda stałego stężenia gazu znacznikowego polega na wprowadzaniu znacznika do strefy przez cały czas trwania badania w takiej ilości, aby stężenie gazu było stałe.

Pomiary przeprowadza się dla budynków lub ich części. Aby stworzyć jedną strefę w całym budynku i zapewnić jednakowe warunki należy otworzyć wszystkie drzwi wewnętrzne i użyć odpowiedniego sprzętu do wymieszania gazu z powietrzem.

Gaz zastosowany w badaniach powinien spełniać następujące wymagania [9]:

- nie być łatwopalny, wybuchowy oraz alergiczny,
- nie posiadać właściwości toksycznych przy stężeniach spotykanych w czasie pomiarów,
- nie podlegać zjawisku absorpcji przez elementy wyposażenia pomieszczenia,
- nie rozkładać się, nie reagować z powietrzem lub z elementami konstrukcji i wyposażenia budynku,
- jego gęstość powinna być zbliżona do gęstości powietrza lub powinien być wcześniej rozcieńczony w powietrzu w celu zwiększenia jego zdolności dyfuzyjnych,

- być łatwo wykrywalny w możliwie niskich stężeniach,
- mieć możliwie niskie stężenie w powietrzu zewnętrznym,
- koszty jego zakupu powinny być możliwie niskie.

W rzeczywistości nie ma gazu, który spełniałby te wszystkie wymagania jednocześnie. Do gazów używanych jako znacznikowe należą: hel (He), ditlenek węgla (CO_2), sześćofluorek siarki (SF_6), czterofluorek węgla (CF_4), podtlenek azotu (N_2O).

Dwutlenek węgla jest gazem wydychanym przez człowieka w procesie oddychania. Ten metabolicznie wytwarzany gaz może być użyty do przeprowadzenia badań metodą gazu śladowego. W czasie gdy użytkownicy przebywają w pomieszczeniu stężenie gazu wzrasta do pewnej wartości, a po opuszczeniu wnętrza można analizować zanik stężenia gazu w pomieszczeniu.

Analiza stężenia podczas użytkowania pomieszczeń pozwala na ocenę jakości powietrza wewnątrz pomieszczenia a po opuszczeniu pomieszczenia przez użytkowników analiza zaniku pozwala określić sprawność systemu wentylacji.

Metoda zaniku stężenia gazu śladowego dopuszcza dwa rodzaje analizy otrzymanych wyników, metodę 2-punktową i wielopunktową.

W metodzie 2-punktowej wartość ta wyznaczana jest ze wzoru (1) [9]:

$$\bar{N} = \frac{1}{t_2 - t_1} \log_e \frac{C(t_1)}{C(t_2)} \quad (1)$$

gdzie:

\bar{N} – uśredniona w czasie właściwa szybkość przepływu powietrza [1/h lub 1/s],

$C(t_1)$ – stężenie w pomieszczeniu, w czasie t_1 [m^3/m^3],

$C(t_2)$ – stężenie w pomieszczeniu, w czasie t_2 [m^3/m^3],

t_1 – początkowy punkt pomiaru [h],

t_2 – końcowy punkt pomiaru [h].

Metodę wielopunktowego zaniku stężenia można stosować, gdy proces zaniku stężenia gazu można mierzyć wiele razy w przedziałach czasu od kilku minut do ok. jednej godziny. Metodę najmniejszych kwadratów w odniesieniu do stężenia gazu stosuje się, gdy mierzy się stężenie gazu co najmniej trzy razy, a przewidywaną wartość właściwej szybkości przepływu powietrza (N) oblicza się z zastosowaniem równania (2).

$$N = \frac{\left(\sum_{j=1}^{np} t_j \right) \cdot \sum_{j=1}^{np} \log_e C(t_j) - n_p \cdot \sum_{j=1}^{np} t_j \cdot \log_e C(t_j)}{n_p \cdot \sum_{j=1}^{np} t_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{np} t_j \right)^2} \quad (2)$$

gdzie:

- N – szacowana właściwa szybkość przepływu powietrza [1/h],
- t_j – j -ty czas, jaki upłynął od początku procesu zaniku $t_1 = 0$,
- $C(t_j)$ – zmierzone stężenie gazu w czasie (t_j),
- np – całkowita liczba punktów zmierzonego czasu, jaki upłynął.

Analiza porównawcza wyników otrzymanych dwoma metodami znajduje się w publikacji [10]. W przypadku niskich wartości stężeń oraz krótkich okresów ich trwania obie metody dają podobne wyniki.

6. BADANIA POZIOMU STĘŻENIA DWUTLENKU WĘGLA ORAZ PYŁÓW ZAWIESZONYCH

Pomiary wzrostu stężenia dwutlenku węgla w trakcie użytkowania budynku czy pomieszczenia pozwalają określić jakość powietrza wewnętrznego. Takie podejście zostało zaproponowane w pracach [5, 15, 24]. Wyniki analizy jakości powietrza w oparciu o poziom stężenia dwutlenku węgla wewnątrz pomieszczeń wykładowych na uczelniach opisano w [3, 6, 22]. Autorzy potwierdzają, że w pomieszczeniach z wentylacją naturalną poziom dwutlenku węgla bardzo szybko przekracza dopuszczalne przepisami wartości, gdyż wymiana wentylacyjna jest zwykle zbyt mała.

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów stężenia dwutlenku węgla oraz poziomu pyłów zawieszonych w pomieszczeniach edukacyjnych. Przedmiotem badań były dwie sale zlokalizowane na parterze budynku kampusu Politechniki Krakowskiej przy



Il. 3. Budynek L-1 na kampusie Politechniki Krakowskiej przy ulicy Warszawskiej.
Fot. aut.

ulicy Warszawskiej 24, budynek L-1 (il. 3), przeznaczone na potrzeby edukacyjne. Analizowane sale zlokalizowane są na parterze budynku i oznaczone numerami 6 oraz 11. Ogólna charakterystyka sal przedstawiona została w tabeli 2.

Tabela 2

Charakterystyka badanych sal wykładowych. Opracowanie aut.

Numer sali	Sala numer 6	Sala numer 11
Przeznaczenie	zajęcia projektowe, wykłady	sala komputerowa
Kubatura	191,5 m ³	146,9 m ³
Powierzchnia	64,9 m ²	49,9 m ²
Liczba okien	4 okna: 2,55 × 1,8 m	3 okna: 2,55 × 1,8 m
Maksymalna liczba użytkowników	40 osób	20 osób
Wentylacja	grawitacyjna, dwa otwory wentylacyjne w pomieszczeniu (10 × 10 cm), nawiewniki w oknach	grawitacyjna, dwa otwory wentylacyjne w pomieszczeniu (10 × 10 cm), nawiewniki w oknach

W obu salach w okresie od listopada 2019 prowadzone były ciągłe pomiary stężenia pyłów zawieszonych PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ z użyciem czujników Looko2. W każdej z sal czujnik umieszczony był na ścianie, 2 m nad poziomem podłogi (il. 4). Trzeci czujnik zlokalizowany został na ścianie zewnętrznej budynku (il. 5). Dodatkowo za pomocą przenośnych czujników Rotronic CP11 (il. 6), w wybranych dniach w tym okresie monitorowano stężenie dwutlenku węgla.



Il. 4. Miernik Looko2 do pomiaru stężenia pyłów zawieszonych wewnątrz sali. Fot. aut.



Il. 5. Miernik Looko2 na ścianie zewnętrznej budynku L-1. Fot. aut.

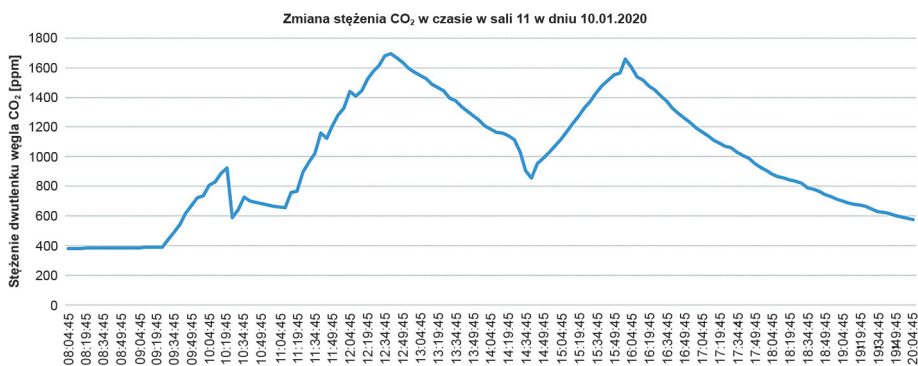
Analiza wartości stężenia dwutlenku węgla prowadzona była w dwóch etapach. W pierwszym etapie użytkownicy znajdowali się w pomieszczeniach. W drugim etapie pomieszczenia były puste. Etap pierwszy pozwolił na ocenę jakości powietrza wewnętrznego, drugi na określenie wydajności systemu wentylacyjnego. Badania w trakcie użytkowania prowadzone były wyłącznie w sali 11. Stężenie dwutlenku węgla mierzone było jednocześnie trzema czujnikami Rotronic (il. 6), rozmieszczonymi na różnych wysokościach i w różnych częściach sali.



Il. 6. Miernik stężenia dwutlenku węgla, temperatury oraz wilgotności względnej ROTRONIC. Fot. aut.

Na ilustracji 7 przedstawiono zmiany stężenia gazu podczas użytkowania pomieszczenia, rejestrowane w dniu 10.01.2020 w godzinach 8:00-20:00. W tym czasie w sali 11 odbywały się zajęcia.

Na ilustracji obserwujemy skoki stężenia po rozpoczęciu zajęć około godziny 9:00, 11:00 oraz 14:00, gdy okna w sali były zamknięte. W zajęciach uczestniczyło 13-15 osób. Badania pokazały bardzo intensywny wzrost stężenia. Spadki na wykresie obrazują otwarcie okna. Pomiędzy godziną 11 a 12 obserwujemy przyrost stężenia o 1000 ppm do poziomu 1600 ppm. Po tym okresie studenci prosili o otwarcie okien, gdyż zaczęli odczuwać dyskomfort związany ze zwiększeniem stężenia



Il. 7. Zmiana stężenia CO₂ w czasie w sali 11 (pomiar: 10.01.2020). Opracowanie aut.

dwutlenku węgla. Po uchyleniu okien następował powolny spadek stężenia, jednak wciąż przekraczało ono wartość 1000 ppm.

Na podstawie tabeli 1 jakość powietrza wewnętrznego możemy określić jako niską.

W okresie zimowym, gdy temperatura zewnętrzna jest niska, ciągłe wietrzenie jest niemożliwe, dlatego okna są otwierane tylko na kilka minut, co uniemożliwia obniżenie stężenia dwutlenek węgla do poziomu 400 ppm, jak w powietrzu zewnętrznym.

W drugim etapie analizy, po opuszczeniu pomieszczenia przez użytkowników, monitorowano zanik stężenia dwutlenku węgla. Analizy zaniku stężenia prowadzone były w wybrane dni w obu salach. Na podstawie zgromadzonych danych obliczono rzeczywistą szybkość przepływu powietrza w pomieszczeniu, na którą wpływa infiltracja oraz wydajność systemu wentylacji. Obliczenia wykonano zgodnie z normą [9], stosując metodę dwupunktową. W zależności od ilości danych pomiarowych w analizie przyjęto okres 1, 2 lub 3 h, jako ostateczny wynik przyjęto wartości średnie.

Na podstawie obliczonych wartości N określono strumień wentylacyjny w pomieszczeniach jako iloczyn wartości N oraz objętości danego pomieszczenia. Wartość ta silnie zależy od warunków atmosferycznych zewnętrznych (temperatury i prędkości wiatru), dlatego wartości różnią się w poszczególnych dniach. Dla sali nr 6 średnia wartość strumienia wentylacyjnego wynosi 52,7 m³/h, natomiast dla sali nr 11: 72,7 m³/h. W odniesieniu do maksymalnej liczby użytkowników w obu pomieszczeniach otrzymujemy wymianę powietrza w sali nr 6 na poziomie 1,3 m³/h na osobę a w sali nr 11: 3,6 m³/h. Wartości te nie spełniają zalecanych wymogów 20 m³/h na osobę.

Szczegółowe wyniki analiz przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Analiza sprawności systemu wentylacji badanych sal. Opracowanie aut.

Sala	Data	Średnia wartość N [1/h]	V_w – strumień wentylacyjny [m ³ /h]
11	29.11.2019	0,49	73,3
11	30.11.2019	0,51	76,3
11	02.12.2019	0,46	68,8
11	11.01.2020	0,53	79,3
11	12.01.2020	0,44	65,8
6	07.01.2020	0,26	49,8
6	09.01.2020	0,28	53,7
6	21.01.2020	0,25	47,9
6	22.01.2020	0,31	59,4

7. ANALIZA STĘŻENIA PYŁÓW ZAWIESZONYCH WEWNĄTRZ POMIESZCZEŃ

Analiza związku między stężeniem cząstek pyłów zawieszonych wewnątrz i na zewnątrz budynku jest szczególnie ważna dla użytkowników, gdy poziom stężenia zanieczyszczeń zewnętrznych jest bardzo wysoki. Kraków jest jednym z miast, nie tylko w Polsce, ale i w Europie, gdzie ten poziom bardzo często przekracza dopuszczalne normy.

Powszechnie stosowanym parametrem opisującym tę zależność jest współczynnik I/O (stężenie wewnętrzne/stężenie zewnętrzne), którego wartość różni się znacznie w zależności od szybkości wymiany powietrza. W wielu krajach, w których zanieczyszczenie pyłami jest związane głównie ze sposobem użytkowania budynku, a jakość powietrza zewnętrznego jest wysoka, ma on wartość powyżej 1. W Polsce w miesiącach zimowych jest on niższy od 1, ponieważ stężenie cząstek stałych na zewnątrz jest wysokie. Jakość powietrza zewnętrznego w Polsce jest klasyfikowana, zgodnie z wymogami Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, według sześciu wartości indeksu jakości powietrza (AQI – ang. *Air Quality Index*). Odpowiednie wartości stężeń PM10 i PM2,5 przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4

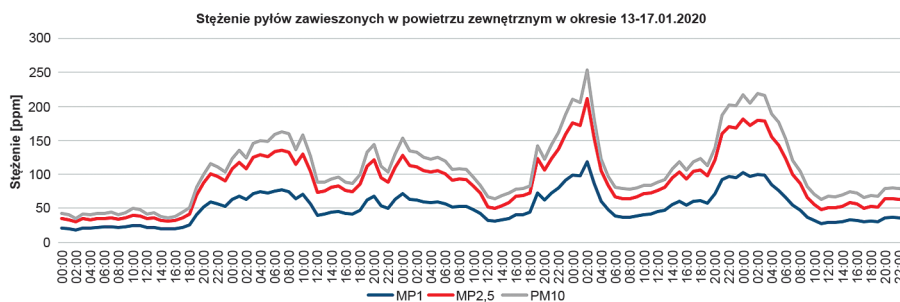
Obowiązujący w Polsce indeks jakości powietrza

Indeks jakości powietrza	PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Bardzo dobry	0-20	0-13
Dobry	20,1-50	13,1-35
Umiarkowany	50,1-80	35,1-55
Dostateczny	80,1-110	55,1-75
Zły	110,1-150	75,1-110
Bardzo zły	> 150	> 110

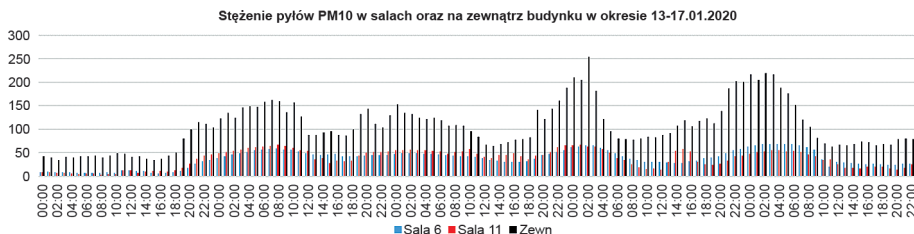
W budynkach z mechanicznym systemem wentylacji wyposażonym w filtry powietrze wpływające do budynku jest częściowo oczyszczane przez filtry w urządzeniach wentylacyjnych. Efekty użycia filtrów zostały opisane w [13, 21]. Według autorów zastosowanie filtrów HEPA może redukować wewnętrzne stężenie pyłów do 60%. Na poziom stężenia pyłów zawieszonych w pomieszczeniu mogą wpływać również źródła wewnętrzne, takie jak palenie tytoniu, używanie kominków itp. Wpływ takich źródeł na poziom stężenia pyłów PM wewnątrz budynków został opisany w [8, 13]. Pomieszczenia analizowane w tej publikacji nie posiadają takich wewnętrznych źródeł emisji pyłów zawieszonych.

Analizie poddano okres 13-17.01.2020, gdyż w ciągu tych dni można było zaobserwować duże wahania stężenia pyłów PM w środowisku zewnętrznym.

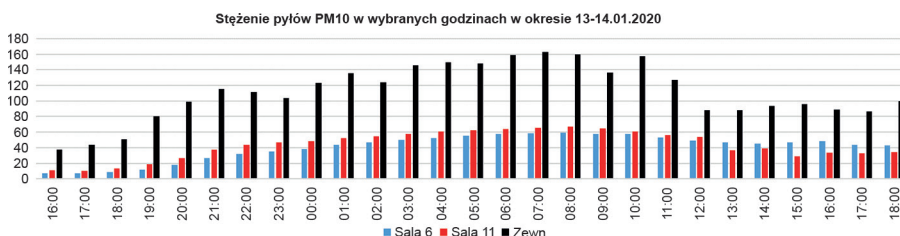
Wykres na il. 8 przedstawia zmianę stężenia pyłów PM₁₀, PM_{2,5} oraz PM₁ na zewnątrz budynku w analizowanym okresie czasu. Stężenie PM₁₀ osiąga poziom powyżej 150 µg/m³ przez kilka godzin w analizowanym okresie czasu. Według klasyfikacji jakości powietrza to bardzo zły stan. Wzrost stężenia pyłów na zewnątrz powoduje wzrost stężeń wewnątrz pomieszczeń. Ilustracje 9 i 10 przedstawiają zmiany stężenia PM₁₀ w pomieszczeniach i na zewnątrz. Wzajemna zależność obydwu stężeń jest wyraźnie widoczna; wzrost stężenia na zewnątrz powoduje wzrost stężenia wewnątrz. Jednak pomimo bardzo złej jakości powietrza na zewnątrz jakość powietrza wewnątrz jest umiarkowana i nie przekracza tego zakresu. Można wnio-



Il. 8. Stężenie pyłów PM₁₀, PM_{2,5} oraz PM₁ na zewnątrz budynku. Opracowanie aut.

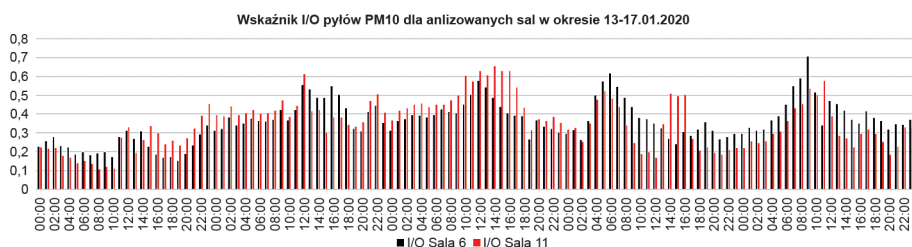


Il. 9. Stężenie pyłu PM₁₀ w salach oraz na zewnątrz budynku w okresie 13-17.01.2020. Opracowanie aut.

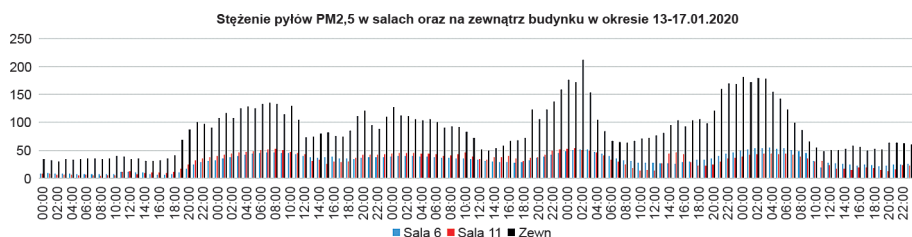


Il. 10. Stężenie pyłu PM₁₀ w salach oraz na zewnątrz budynku w wybranych godzinach analizowanego okresu. Opracowanie aut.

skować, że duża szczelność obudowy budynku (mała wymiana wentylacyjna) jest w tym przypadku korzystna dla użytkowników. Zależność I/O dla pyłu PM10 dla analizowanego okresu przedstawiona została na il. 11. Dla niższych zewnętrznych wartości stężenia PM10 wskaźnik I/O przyjmuje wartości z przedziału 0,3-0,5. Wraz ze wzrostem stężenia na zewnątrz stężenie wewnętrzne również wzrasta, ale jednocześnie zwiększa się różnica między wartościami i w efekcie wskaźnik I/O wykazuje tendencję malejącą.



Il. 11. Wskaźnik I/O pyłów PM10 dla sal w analizowanym okresie. Opracowanie aut.



Il. 12. Stężenie pyłu PM2,5 w salach oraz na zewnątrz budynku w okresie 13-17.01.2020. Opracowanie aut.

Na ilustracji 12 przedstawiono zależność stężenia frakcji PM2,5 w salach od stężenia PM2,5 na zewnątrz. Podobnie jak w przypadku PM10, wzrost stężenia na zewnątrz powoduje wzrost stężenia wewnątrz pomieszczenia. W tym przypadku również jakość powietrza wewnętrznego wzrasta do poziomu umiarkowanego, co oznacza pozytywny wpływ niskiej wymiany wentylacyjnej na wartości stężeń pyłów zawieszonych wewnątrz.

8. WNIOSKI

1. Badania metodą gazu znacznikowego, za pomocą metabolicznie generowanego dwutlenku węgla, mogą być źródłem informacji na temat wydajności systemu wentylacyjnego w pomieszczeniu oraz jakości powietrza wewnętrznego.
2. Analiza zaniku stężenia gazu znacznikowego umożliwia określenie rzeczywistej wymiany powietrza między środowiskami wewnętrznym i zewnętrznym.
3. Przeprowadzone badania pomieszczeń edukacyjnych wykazały bardzo niską wydajność zastosowanego systemu wentylacji naturalnej, czego konsekwencją jest bardzo niska jakość powietrza wewnętrznego.
4. Jednoczesne pomiary stężenia cząstek stałych w pomieszczeniu i w otoczeniu zewnętrznym pozwoliły potwierdzić, że stosunek I/O (wewnętrzny/zewnętrzny) różni się znacznie ze względu na wahania warunków zewnętrznych. Wysokie stężenie PM na zewnątrz budynku ma decydujący wpływ na jakość powietrza w pomieszczeniu, zwłaszcza gdy nie ma w nim źródeł zanieczyszczeń. Jednocześnie niski wskaźnik wymiany powietrza można uznać za formę ochrony przestrzeni wewnętrznej przed wnikaniem cząstek stałych ze środowiska zewnętrznego.
5. W obu opisanych salach prowadzone są ciągłe pomiary stężenia pyłów zawieszonych oraz dwutlenku węgla. Planowane są również symulacje wymiany powietrza w celu wyznaczenia zależności między jakością powietrza wewnętrznego a szczelnością obudowy oraz sprawnością systemu wentylacji.

LITERATURA

- [1] ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019. *Ventilation for acceptable indoor air quality*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2019.
- [2] Basińska M., Michałekiewicz M., Górzeński R., *Jakość powietrza. Przepisy i wymagania dotyczące komfortu termicznego, minimalnego strumienia powietrza, stężenia ditlenku węgla i pyłów*, Rynek Instalacyjny, 5, 2016.
- [3] Benedettelli M., Naticchia B., Carbonari A., Pascucci M., *Testing of a Tracer Gas Based Measurement Procedure to Assess Air Change Rates in Buildings*, Conference: 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, DOI: 10.22260/ISARC2015/0025.
- [4] Bomberg M., Kisilewicz T., Nowak K., *Is there an optimum range of airtightness for a building?*, Journal of Building Physics, vol. 39, 2016, 395-421.

- [5] Bulińska A., *Analiza wykorzystania generowanego metabolicznie ditlenku węgla jako znacznika gazowego do określania wymiany powietrza w pomieszczeniach*, rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2011.
- [6] Cichowicz R., Gawron-Skarbek A., Godała M., Zimna-Walendzik E., Sabiniak H., Szatko F., *Assessment of carbon dioxide concentration in the air of selected university facilities*, *Problemy Higieny i Epidemiologii*, 95 (2), 2014, 287-291.
- [7] Cohen A., Anderson A., Ostro B., Pandey K., Krzyzanowski M., Kunzli N., Gutschmidt K., Pope A., Romieu I., Samet J., Smith K., *The global burden of disease due the outdoor air pollution*, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 68, 2005, 1-7.
- [8] Estokova A., Stevulova N., Kubincova L., *Particulate matter investigation in indoor environment*, *Global NEST Journal*, vol. 12, 1, 2010.
- [9] PN-EN 12569:2012. *Ciepłne właściwości użytkowe budynków i materiałów. Określenie właściwej szybkości przepływu powietrza w budynkach. Metoda rozcieńczania gazu znacznikowego*.
- [10] Kisilewicz T., Nowak-Dzieszko K., *Low airflow measurements by means of gas tracing method*, *Materials Science and Engineering*, vol. 415, XIII International Research-Technical Conference on the Problems of Designing, Construction and Use of Low Energy Housing, 11-13 września 2018, Kraków 2018.
- [11] Krause P., *Szczelność obudowy a ochrona cieplna budynku*, *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, 2, 2007, 147-150.
- [12] Ludwiczak A., Ratajczak K., *Ventilation of didactic and educational facilities – a review of selected Polish and foreign requirements for air flow and carbon dioxide concentration*, *Rynek Instalacyjny*, 3, 2018.
- [13] Monn Ch., Hogger D., Fuchs A., Junker M., Kogelschatz D., Roth N., Wanner H., *Particulate matter less than 10 μm (PM10) and fine particles less than 2.5 μm (PM2.5): relationships between indoor, outdoor and personal concentrations*, *The Science of the Total Environment*, 208, 1997, 15-21.
- [14] Murkowski A., Skórska E., *Czy zwiększona zawartość dwutlenku węgla w powietrzu ma wpływ na sprawność intelektualną człowieka?*, *Kosmos – Problemy Nauk Biologicznych*, 4 (313), 2016.
- [15] Persily A. K., *Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide*, *Ashrae Transactions*, 103, 1997, 1-12.
- [16] PN-EN 16798-1:2017. *Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems*, 2017.
- [17] PN-83/B-03430. *Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania*, Polski Komitet Normalizacyjny, 1983.

- [18] Quang T., He C., Morawska L., Knibbs L., *Influence of ventilation and filtration on the indoor particle concentrations in urban office buildings*, Atmospheric Environment, vol. 79, 2013, 41-52.
- [19] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 10 lipca 2014 r. w sprawie wymagań lokalowych i sanitarnych, jakie musi spełniać lokal, w którym ma być prowadzony żłobek lub klub dziecięcy (Dz. U. z 2014, poz. 925, z późn. zm.).
- [20] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 października 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu.
- [21] Spilak M., Karotki G., Kolaric B., Frederiksen M., Loft S., Gunnarsen L., *Evaluation of building characteristics in 27 dwellings in Denmark and the effect of using particle filtration units on PM_{2.5} concentrations*, Building and Environment, vol. 73, 2014, 55-63.
- [22] Sowa J., *Wentylacja a jakość powietrza w budynkach szkolnych*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, 3, 2002, 24-29.
- [23] Sowa J., *Wpływ badań nad jakością powietrza w pomieszczeniach na ewolucję poglądów dotyczących wymaganej intensywności wentylacji. Problemy jakości powietrza wewnętrznego w Polsce 2001*, Wydawnictwa Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002, 303-312.
- [24] Zhang W., Wang L., Ji Z., Hui Y., *Test on Ventilation Rates of Dormitories and Offices in University by the CO₂ Tracer Gas Method*, Procedia Engineering, 121, 2015, 662-666.

Anna Dudzińska*

WPŁYW PRZYJĘTEGO MODELU KOMFORTU NA OCENĘ WARUNKÓW W PRZEGRZEWANYM BUDYNKU PASYWNYM

IMPACT OF THE ADOPTED COMFORT MODEL ON THE ASSESSMENT OF CONDITIONS IN AN OVERHEATED PASSIVE BUILDING

STRESZCZENIE

W niniejszym rozdziale podjęto temat komfortu cieplnego w pasywnej szkole w okresie letnim. Opierając się na dwukrotnie przeprowadzonych w wybranej klasie doświadczalnych badaniach warunków termicznych, w programie Design Builder utworzono model symulacyjny obiektu. Sprawdzono, czy bez zastosowania chłodzenia z gruntu racjonalne modyfikacje przyjętych rozwiązań mogłyby ograniczyć dyskomfort latem. Analizy symulacyjne dotyczyły wpływu wentylacji mechanicznej i naturalnej na parametry komfortu cieplnego. Oceniono rolę zewnętrznych łamaczy światła oraz orientacji bryły szkoły w ograniczaniu przegrzewania. Dokonano analizy komfortu w oparciu o standardowe wskaźniki Fangera oraz za pomocą modelu komfortu adaptacyjnego według kryterium ASHRAE i normy PN-EN 15251, z uwzględnieniem wymagań nowej normy EN 16798-1. Na podstawie analizy stwierdzono, że wykorzystanie do chłodzenia wymiennika gruntowego jest najskuteczniejsze w ograniczaniu dyskomfortu w czasie wysokich temperatur zewnętrznych. Jednak w przypadku zastosowania adaptacyjnego modelu oceny warunków, proponowane proste, bezinwestycyjne i niewymagające w działaniu znacznych nakładów energii rozwiązania są w stanie zapewnić komfortowe środowisko we wnętrzu szkoły.

Słowa kluczowe: komfort cieplny, komfort adaptacyjny, szkoła pasywna, przegrzewanie

ABSTRACT

This chapter deals with the thermal comfort evaluation in a passive school in summer. Based on experimental studies of thermal conditions, carried out twice in a selected class, a simulation model of the object was created in Design Builder. It was checked that if the school did not use ground cooling, the rational modifications of the solutions adopted therein could reduce discomfort in the summer. Simulation analyzes concerned the impact of mechanical and natural ventilation on thermal comfort parameters. The role of external light breakers and the orientation of the school building in reducing overheating was assessed. Comfort analysis was performed based on standard Fanger indices and using the adaptive comfort model according to the ASHRAE criterion and PN-EN 15251, taking into account

* Dr inż. Anna Dudzińska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, Politechnika Krakowska.

the requirements of the new EN 16798-1 standard. Based on the analysis, it was found that the use of a ground heat exchanger for cooling is most effective in reducing discomfort during high outdoor temperatures. However, if an adaptive model of condition assessment is used, the proposed simple, non-investment and low-energy solutions are able to provide a comfortable environment inside the school.

Keywords: thermal comfort, adaptive comfort, passive school, overheating

1. WSTĘP

Pogłębiający się efekt cieplarniany oraz odczuwalne zmiany klimatyczne są poważnym zagrożeniem humanitarnym i ekologicznym współczesnego świata. Szybko postępujące niekorzystne oddziaływania środowiskowe wymuszają poszukiwanie odpowiednich rozwiązań technologicznych, pozwalających na projektowanie zrównoważonych i efektywnych energetycznie budynków. Ograniczenie ilości zużywanej energii nie powinno w żaden sposób obniżyć poziomu bezpieczeństwa i komfortu użytkowników. Odpowiedzią na wyzwania współczesnych problemów ekologicznych jest intensywnie rozwijające się budownictwo energooszczędne. Powszechnie znaną i coraz częściej stosowaną generacją tego typu obiektów są budynki pasywne. Wartością graniczną klasyfikującą obiekt jako pasywny jest zapotrzebowanie na energię do ogrzewania mniejsze niż $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$ energii końcowej rocznie. Koncepcja budynków pasywnych zakłada minimalizację strat przy równoczesnym dążeniu do maksymalnego wykorzystania biernych zysków energetycznych i zysków wewnętrznych. Wyjątkowo szczelna obudowa zewnętrzna, wysoka izolacyjność przegród oraz rozmieszczenie przeszkleń głównie na elewacji południowej lub wschodniej mogą stanowić poważne wyzwanie dla jednoczesnego zapewnienia latem komfortu termicznego wewnątrz.

Poczucie komfortu cieplnego uwarunkowane jest szeregiem parametrów środowiskowych (temperatura powietrza, prędkość ruchu powietrza, temperatura promieniowania otaczających powierzchni, wilgotność powietrza) oraz indywidualnych (aktywność fizyczna, izolacyjność cieplna odzieży). Ocena komfortu cieplnego dla klimatu umiarkowanego odbywa się na podstawie normy PN-EN ISO 7730:2006 [23]. Zarówno w przypadku budynków mechanicznie wentylowanych, jak i przewietrzanych w sposób naturalny, obliczane wartości wskaźników PMV (ang. *Predicted Mean Vote*) oraz PPD (ang. *Predicted Percentage of Dissatisfied*) porównywane są z wartościami odniesienia, zawartymi w normie [23].

W obiektach edukacyjnych odpowiedni mikroklimat wpływa bezpośrednio na percepcję oraz wydajność uczenia się, gwarantując przyjemne, bezpieczne i efektywne wykonywanie codziennych obowiązków [8, 16]. W związku ze zmianami klimatycznymi oraz modyfikowanymi wymogami dotyczącymi zużycia energii, problematyka komfortu cieplnego w szkołach w okresie letnim jest w ostatnich latach częściej poruszana na łamach światowej literatury naukowej [5, 8, 15-17, 25-31], ale nadal

niewystarczająco biorąc pod uwagę rangę zagadnienia. Badania przeprowadzone w Stanach Zjednoczonych [6] oraz w Wielkiej Brytanii [19] wykazały, że w budynkach wyposażonych w naturalny system wentylacji powinno przyjmować się tzw. adaptacyjny model komfortu cieplnego. Użytkownicy takich obiektów skłonni są zaakceptować mniej korzystne warunki bądź aktywnie się do nich dostosować. W obecnie szeroko propagowanym budownictwie niskoenergetycznym projektuje się mechaniczny systemem wentylacji, który teoretycznie wyklucza adaptacyjną koncepcję komfortu cieplnego. Aplikacja badań naukowych do rzeczywistych trendów budowlanych jest zatem ciągle trudna do bezpośredniego przełożenia na praktykę projektową i eksploatacyjną [12]. Niemniej jednak szersze dopuszczalne zakresy temperatur wewnętrznych, oparte na modelach adaptacyjnych, stosuje się coraz częściej do oceny warunków cieplnych w budynkach z wentylacją hybrydową.

Przedmiotem analiz i badań prezentowanych w tym rozdziale jest budynek pierwszej w Polsce szkoły w standardzie obiektu pasywnego. Celem prowadzonych badań jest próba znalezienia odpowiedzi na pytanie, czy zakładając racjonalne modyfikacje przyjętych w budynku szkoły rozwiązań, intensywne nocne chłodzenie wnętrza i rezygnację z kosztownej instalacji pompy ciepła z wymiennikiem gruntowym, możliwe byłoby ograniczenie przegrzewania podczas gorących dni. Sprawdzone także, czy fizjologiczna adaptacja użytkowników klasy do panujących warunków pozwoliłaby na wyeliminowanie uczucia dyskomfortu latem.

W analizowanym obiekcie edukacyjnym zastosowano wprawdzie mechaniczną wentylację nawiewno-wywiewną, ale otwieranie okien było także bardzo często stosowane. Do oceny komfortu cieplnego postanowiono użyć zatem obydwu stosowanych modeli. Początkowo przedstawiono wyniki pomiarów komfortu cieplnego z użyciem wskaźników PMV i PPD, przeprowadzonych w pasywnej szkole podstawowej. Otrzymane rezultaty badań były podstawą do przeprowadzenia analizy symulacyjnej, dotyczącej ograniczania dyskomfortu latem, w zależności od zastosowanych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych oraz przyjętego modelu komfortu. W programie Design Builder dokonano analizy komfortu na bazie standardowych wskaźników Fanger'a oraz modelu komfortu adaptacyjnego według kryterium ASHRAE i normy PN-EN 15251.

2. BADANIA MIKROKLIMATU W PASYWNEJ SZKOLE W BUDZOWIE

W ramach przeprowadzonych badań doświadczalnych wykonano pomiary komfortu cieplnego w jednej z klas szkolnego budynku pasywnego. Budynek szkoły to dwukondygnacyjny, niepodpiwniczony obiekt o powierzchni ok. 800 m², położony na osi północ-południe, zlokalizowany w Budzowie na Dolnym Śląsku (il. 1). Na parterze znajdują się pomieszczenia gospodarcze, wentylatornia, świetlica, jadalnia, pokój nauczycielski oraz węzeł sanitarny. Na piętrze natomiast ulokowano sale lekcyjne

wraz z sanitariatami. Głównym materiałem, z którego wykonano ściany są bloczki silikatowe o grubości 25 cm, charakteryzujące się dużą pojemnością cieplną. Ściany ocieplono styropianem o grubości 32 cm, co pozwoliło na uzyskanie współczynnika przenikania dla przegród zewnętrznych ok. $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

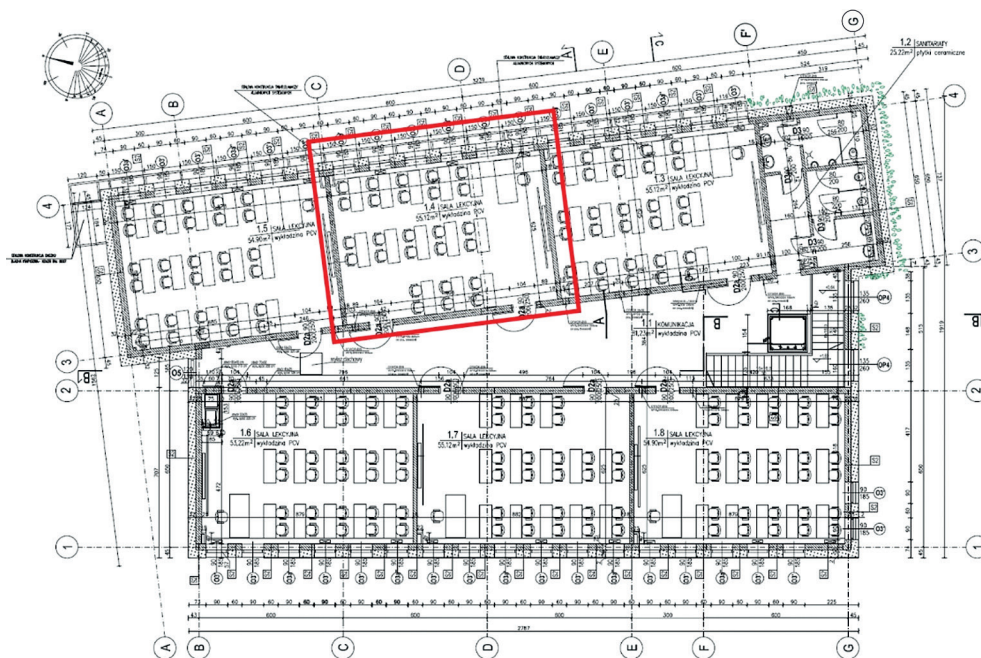


Il. 1. Szkoła pasywna w Budzowie. Archiwum aut.

Pomiary letnie komfortu cieplnego przeprowadzono dwukrotnie w czerwcu 2013 oraz 2014 r. Okres badań oraz klasę wschodnią o powierzchni ok. 55 m^2 wybrano ze względu na nasłonecznienie oraz warunki eksploatacji szkoły w godzinach 7.00-15.00 (il. 2).

Należy zaznaczyć, że średnia temperatura powietrza zewnętrznego podczas badań w 2014 r. wynosiła 28°C , podczas gdy w czerwcu 2013 zaledwie 23°C . Obliczone wartości podstawowych parametrów środowiskowych dla przeprowadzonych badań letnich podano w tabeli 1.

Ze względu na wysokie temperatury wewnętrzne w okresie wiosenno-letnim i dyskomfort użytkowników obiektu (tabela 1) w 2014 r. uruchomiono chłodzenie budynku, wykorzystując do tego celu sondy gruntowe współpracujące z pompą ciepła. Po wprowadzeniu mechanicznego chłodzenia wartości przewidywanej oceny średniej PMV wskazują na komfortowe warunki we wnętrzu badanej klasy. Średnia wartość PMV wynosi $-0,30$ i mieści się w wymaganym dla budynków kategorii II przedziale komfortu $-0,5 < \text{PMV} > +0,5$ (tabela 1).



II. 2. Rzut piętra z zaznaczeniem badanej klasy [24]

Tabela 1

Wybrane miary opisu statystycznego dla wybranych wielkości charakteryzujących środowisko wewnętrzne badanej klasy. Opracowanie aut.

Miary statystyczne	Temperatura powietrza wewnętrznego		Temperatura promieniowania		Wskaźnik przewidywanej oceny średniej		Wskaźnik określający osoby niezadowolone	
	t_a (°C)		t_r (°C)		PMV (-)		PPD (%)	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014
Wartość średnia	26,19	24,67	26,80	24,94	0,86	-0,30	20,55	10,00
Wartość minimalna	25,76	22,72	26,52	23,49	0,78	-0,95	17,92	5,00
Wartość maksymalna	26,53	27,10	28,04	26,99	0,99	1,00	25,71	24,24
Odchylenie standardowe	0,19	1,17	0,40	0,90	0,05	0,38	1,78	5,10
Wartość występująca najczęściej w zbiorze danych	26,26	24,39	26,54	24,58	0,84	-0,43	19,05	5,01

Mimo, że wartości temperatury zewnętrznej w analizowanym okresie w 2014 r. przekraczały 30°C , to wspomagana wymiennikiem gruntowym mechaniczna wentylacja była w stanie zapewnić odpowiednie warunki użytkownikom obiektu edukacyjnego. Instalacje pompy ciepła korzystnie kształtują mikroklimat latem, ale też wiążą się ze znacznymi nakładami energii elektrycznej, a poprzez wysoki współczynnik nakładu podwyższają istotnie zapotrzebowanie na energię pierwotną. Kolejnym aspektem jest ocena środowiskowo-ekologiczna budynków i współczesne tendencje do możliwie najprostszych rozwiązań w budownictwie. W związku z tym, za pomocą programu do symulacji Design Builder sprawdzono, czy bez stosowania chłodzenia z gruntu racjonalne modyfikacje przyjętych rozwiązań mogłyby ograniczyć dyskomfort latem.

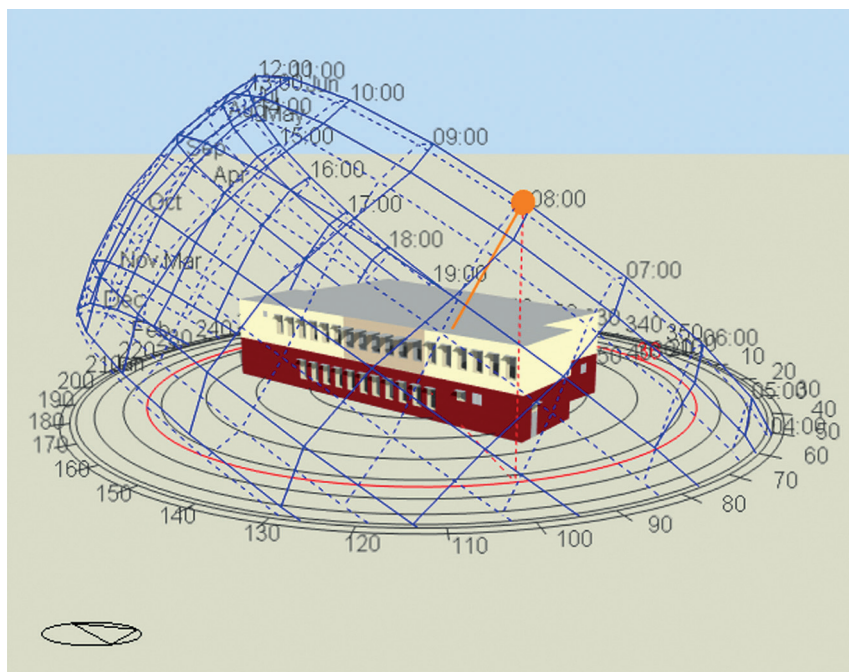
3. ANALIZY SYMULACYJNE KOMFORTU CIEPLNEGO WEDŁUG KRYTERIUM FANGERA

3.1. ZAŁOŻENIA PRZYJĘTE DO ANALIZY

W programie symulacyjnym Design Builder utworzono model pasywnej szkoły (il. 3). Uwzględniono geometrię obiektu, jego usytuowanie, strukturę przegród, instalację grzewczą, szczegółowe harmonogramy przebywania osób, działanie oświetlenia i wszystkich innych systemów instalacyjnych tego budynku.

Walidację utworzonego modelu wykonano oceniając zgodność wyników symulacji z wynikami pomiarów temperatury powietrza wewnętrznego w analizowanej klasie w dniach 09-11.06.2014. Policzony współczynnik korelacji r_{xy} , równy 0,87, w analizie statystycznej oznacza bardzo wysoką zależność [13]. W związku z tym wykonany w programie Design Builder model pasywnej szkoły w Budzowie mógł posłużyć do dalszych analiz.

W pierwszej kolejności modyfikacjom poddano zastosowane w szkole systemy osłon zewnętrznych. Z uwagi na budzącą duże wątpliwości, wyjątkowo małą długość łamaczy światła, równą 0,4 m, zwiększono ich wysięg do 1,24 m. Kolejnym, poza osłonami, istotnym elementem budynków energooszczędnych jest właściwa orientacja bryły. Rekomendowana orientacja budynków pasywnych względem stron świata zakłada umieszczenie podłużnej osi budynku na kierunku wschód–zachód. Budynek szkoły w Budzowie jest zrealizowany niemal dokładnie na osi północ–południe. W związku ze sprzecznością pomiędzy wytycznymi budownictwa pasywnego, a przyjętym w szkole rozwiązaniem dokonano obrotu modelu budynku szkoły o 90° .



Il. 3. Elewacja północno-wschodnia modelu pasywnej szkoły podstawowej w Budzowie wygenerowanego w programie Design Builder. Opracowanie aut.

Przeprowadzono analizy dla okresu dwumiesięcznego: 01.05-31.06.2014. Przyjęto następujące warianty symulacji:

1 – referencyjny (zgodny z faktycznym użytkowaniem obiektu)

Wentylacja mechaniczna pracuje z wydajnością 100% (ok. 4,5 ac/h) w czasie użytkowania obiektu w godzinach 7.00-15.00, a w nocy (23.00-6.00) zwiększony jest przepływ powietrza zewnętrznego (maksymalna wydajność wentylacji) w celu chłodzenia budynku (ang. *free-cooling*), kiedy pozwalają na to warunki zewnętrzne. W pozostałym czasie realizowana jest przynajmniej jedna wymiana powietrza w ciągu godziny. To minimalne natężenie przepływu powietrza zewnętrznego (jedna wymiana na godzinę) ma miejsce, jeśli temperatura powietrza zewnętrznego jest wyższa niż 24°C. Chłodzenie jest pasywne – bez wykorzystania pompy ciepła, używana jest tylko pompa obiegowa; woda krążąca w wymiennikach ziemnych jest pompowana do chłodnicy układu rekuperacji, gdzie następuje schłodzenie powietrza dystrybuowanego po budynku. Zgodnie z projektem w programie zamodelowano łamacze światła, o wysięgu 0,4 m na elewacji wschodniej oraz 1,24 m na elewacji zachodniej.

2 – zmodyfikowany

Nowy model jest wyposażony w mechaniczną wentylację dzienną i nocną; maksymalny przepływ powietrza zewnętrznego (ok. 4,5 ac/h) w godz. 23.00-6.00,

wentylacja mechaniczna włączona w dzień (7.00-15.00) – 4,5 ac/h, w pozostałym czasie 1 ac/h. W tym wariantcie nie korzystano z gruntowego wymiennika i wentylowania naturalnego. Uwzględniono obrót bryły budynku o 90° w kierunku południowym oraz wydłużenie zewnętrznych łamaczy światła na elewacji wschodniej do długości 1,24 m.

Na oknach od strony wewnętrznej zamontowano rolety. W modelowaniu obu wariantów założono, że osłony wewnętrzne są opuszczone gdy temperatura w klasie osiąga wartość 24°C. Przyjęty do analizy zakres temperatury komfortowej powietrza 24-27°C wynika z ustalonego tempa metabolizmu dzieci w badanej szkole, równego 108 W/m² (1,33 met), oraz poziomu izolacyjności odzieży (0,5 clo), charakterystycznego dla okresu letniego.

3.2. WYNIKI ANALIZY KOMFORTU CIEPLNEGO

W tabeli 2 zestawiono liczby godzin w poszczególnych przedziałach wskaźnika przewidywanej oceny średniej, obliczone na podstawie symulacji. Liczba godzin w przedziale komfortu cieplnego dla wariantu referencyjnego jest o 45% wyższa niż w modelu zmodyfikowanym. W zakresie najbliższym górnej granicy komfortu Fangera w przypadku wariantu referencyjnego jest o 40% mniej godzin w stosunku do modelu zmodyfikowanego. Dla obu porównywanych tu przypadków nie występują wartości PMV powyżej 1,5.

Tabela 2

Godzinowy rozkład wskaźnika PMV dla przyjętych wariantów symulacji. Opracowanie aut.

Warianty symulacji	Liczba godzin w przedziale komfortu cieplnego $-0,5 < PMV < +0,5$	Liczba godzin w przedziale $+0,5 < PMV < +1,0$	Liczba godzin w przedziale $+1,0 < PMV < +1,5$	Liczba godzin w przedziale $+1,5 < PMV < +2,0$
Referencyjny	165	9	0	0
Zmodyfikowany	91	15	11	0

Zaskakujące na pozór rezultaty, dotyczące zróżnicowanej sumy godzin w przyjętych wariantach, wynikają z nieuwzględnienia w analizach temperatury poniżej przyjętego poziomu komfortu. Domeną umiarkowanej strefy klimatycznej są silnie zróżnicowane wartości temperatury zewnętrznej w okresie wiosenno-letnim. W analizowanym dwumiesięcznym przedziale czasowym 50% ze wszystkich 1464 h to temperatury powietrza o wartościach poniżej 15°C. Zaledwie 15 h stanowią z kolei temperatury przekraczające wartość 30°C. W przedziale wartości temperatury 25-30° znajduje się 75 h, co odpowiada 5% całego rozpatrywanego tu okresu.

Przez wzgląd na założoną w analizach niską izolacyjność odzieży, równą 0,5 clo, skupiono uwagę tylko na najgorętszych dniach z rozpatrywanego okresu dwumiesięcznego. Takie podejście daje możliwość obiektywnego szacowania obciążenia termicznego, dla którego najlepszą miarą są liczby godzin dyskomfortu.

Można zatem stwierdzić, że system wentylacji mechanicznej jedynie w połączeniu ze źródłem chłodu, w formie gruntowego wymiennika ciepła i pompy ciepła, skutecznie ogranicza dyskomfort latem. Sugerowane modyfikacje, dotyczące orientacji budynku i dodatkowych osłon, nie są tak efektywne jak chłodzenie gruntowe.

Oceniając jednak w nieco inny sposób rozważane rozwiązania, należy stwierdzić, że główna różnica między obydwoma wariantami dotyczy 17 h dodatkowego przegrzewania wnętrza w wariancie zmodyfikowanym. Stanowi to tylko ok. 5% analizowanego dwumiesięcznego okresu i ułamek procenta całego okresu użytkowania budynku. W wytycznych stworzonych przez Instytut Budownictwa Pasywnego w Darmstadt, odnośnie projektowania budynków pasywnych [9], dopuszcza się okres przegrzewania wnętrza trwający nie dłużej niż 10% w ciągu roku. Z kolei autorytatywna w dziedzinie inżynierii budowlanej brytyjska organizacja CIBSE (ang. *Chartered Institution of Building Services Engineers*) podaje zalecane wartości temperatury szczytowej okresu letniego i kryteria przegrzania. Według tej instytucji szkoły oraz biura powinny mieć nie więcej niż 1% godzin użytkowych w ciągu roku w temperaturze operatywnej $\geq 28^{\circ}\text{C}$ [18]. Inne wytyczne zawarte w Building Bulletin BB87 [11], dotyczące projektowania odpowiednich warunków środowiskowych w szkołach, zawierają dopuszczalne kryteria przegrzania wynoszące 80 h użytkowych w ciągu roku o temperaturze $\geq 28^{\circ}\text{C}$. W tym kontekście proponowane modyfikacje budynku szkoły byłyby wystarczające w celu utrzymania w jej wnętrzu akceptowalnych warunków eksploatacji.

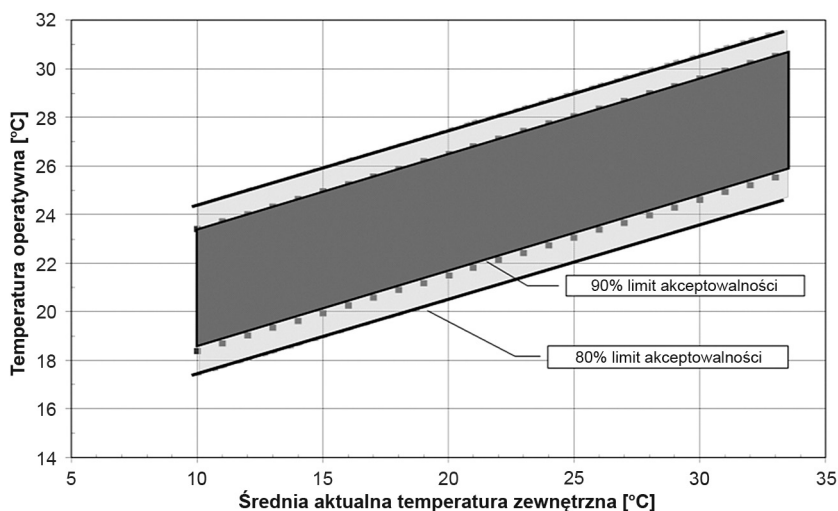
Wskaźnik komfortu PMV został zdefiniowany dla ściśle kontrolowanych warunków z mechaniczną wentylacją, natomiast w budynkach z wentylacją naturalną sugeruje się uwzględnianie adaptacji użytkowników do parametrów otoczenia [14, 21]. Choć w analizowanej szkole w Budzowie zastosowano mechaniczną wentylację, to jednak w rzeczywistości w trakcie użytkowania budynku otwierano okna. W modelowaniu budynku założono niską wartość izolacyjności odzieży clo równą 0,5, ale podczas badań stwierdzono, że uczniowie i nauczyciele bez problemu dopasowują ubiór do panujących warunków.

W kontekście powyższych rozważań można stwierdzić, że żaden pakiet założeń dotyczących oceny komfortu cieplnego nie jest konsekwentnie realizowany w badanej szkole, dlatego postanowiono użyć obydwu podejść do oceny warunków termicznych.

4. KOMFORT ADAPTACYJNY

4.1. DEFINICJA I PRZYJĘTE MODELE

W dokumencie ASHRAE 55 [1] został przyjęty tzw. adaptacyjny model komfortu termicznego, zdefiniowany jako „model, który odnosi projektową temperaturę wnętrza albo akceptowany zakres temperatur wnętrza do zewnętrznych parametrów meteorologicznych i klimatycznych” [2, 4]. Model ten uwzględnia także kontrolowanie parametrów komfortu przez użytkowników oraz ich możliwości adaptacyjne.



Il. 4. Dopuszczalne zakresy komfortowej temperatury operatywnej dla pomieszczeń naturalnie wentylowanych wg [1]

W normie ASHRAE 55 model adaptacyjny komfortu jest opisany równaniami regresji liniowej, które zawierają zależność pomiędzy operatywną temperaturą wewnętrzną i średnią temperaturą zewnętrzną (il. 4). Wskazane są dwa zakresy operatywnych temperatur wewnętrznych, które będą traktowane jako komfortowe odpowiednio dla 80 i 90% użytkowników, przy różnych zewnętrznych wartościach temperatury powietrza [3, 14].

Graniczne zakresy wartości operatywnych temperatur brzegowych dla poziomu 80% akceptowalności są opisane równaniami (1) i (2):

$$T_{\max} = 0,31T_{rm} + 21,3^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

$$T_{\min} = 0,31T_{rm} + 14,3^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

gdzie:

T_{rm} – średnia aktualna temperatura zewnętrzna liczona jako ważona średnia narastająca temperatura powietrza zewnętrznego z ostatnich 30 dni [°C].

Temperatura idealna według normy ASHRAE jest średnią arytmetyczną T_{max} i T_{min} . Zakres 90% akceptowalności stosuje się dla budynków, w których wymagany jest bardzo wysoki poziom komfortu cieplnego.

Adaptacyjna metoda określenia komfortu cieplnego według ASHRAE znajduje zastosowanie w pomieszczeniach bez mechanicznego chłodzenia, w których ciepło metaboliczne użytkowników mieści się w zakresie 1,0-1,3 met. W modelu tym oczekuje się, że użytkownicy będą ubierali się adekwatnie do panującej na zewnątrz temperatury, w zakresie 0,5-1,0 clo. Wyniki komfortu adaptacyjnego według modelu ASHRAE służą do analizy przegrzewania i generowane są tylko wtedy, gdy aktualna średnia temperatura powietrza zewnętrznego jest wyższa niż 10 i niższa niż 33,5°C [1].

Podobny model adaptacyjny został wykorzystany w normie PN-EN 15251, która jest tłumaczeniem wersji angielskiej EN 15251:2007 [22]. W 2019 r. norma europejska została zaktualizowana do wersji EN 16798-1 [10]. Zarówno w normie PN-EN 15251, jak i w zaktualizowanej EN 16798-1 [10] wyznaczono graniczne wartości temperatury operatywnej dla poszczególnych kategorii budynków. Temperaturę określaną jako komfortowa oblicza się tak samo w obu przypadkach, według wzoru (3):

$$T_c = 0,33T_{rm} + 18,8^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

gdzie;

T_{rm} – ciągła średnia temperatura zewnętrzna liczona jako średnia ważona temperatura zewnętrzna z ostatnich 5 dni [°C].

Granice dla kategorii I (akceptowalność 90%), II (akceptowalność 80%) i III (akceptowalność 65%) zdefiniowano jako dopuszczalne odchyłki od temperatury komfortowej T_c . W normach wykreślono linie ograniczające strefę komfortu dla każdej kategorii budynków. W tabeli 3 zestawiono dopuszczalne odchyłki od wartości temperatury operatywnej dla trzech kategorii budynków. Zakładając normalny poziom oczekiwań, dla nowych budynków zaleca się stosowanie kryterium II kategorii.

Podstawowe kryteria dopuszczające stosowanie modelu adaptacyjnego oraz górne wartości granicznej temperatury w danej kategorii (tabela 3) nie uległy zmianie po aktualizacji normy europejskiej. W związku z powyższym, przeprowadzone według normy PN-EN 15251, analizy przegrzewania są aktualne i mogą stanowić podstawę do sformułowania ogólnych wniosków, dotyczących racjonalnego projektowania i eksploataowania budynków pasywnych, uwzględniających nie tylko wymagania komfortu cieplnego, ale i samej jego oceny.

Adaptacyjny model według normy PN-EN 15251, podobnie jak w przypadku modelu według ASHRAE, jest stosowany w pomieszczeniach bez mechanicznego chłodzenia, gdzie wewnętrzne warunki cieplne są regulowane poprzez otwieranie

okien. Jego użytkownicy charakteryzują się niewielką aktywnością fizyczną, bliską siedzącej i metabolizmem na poziomie 1,0-1,3 met [22]. Aktywność fizyczna dzieci w szkole w Budzowie tylko nieznacznie przekracza górną wartość graniczną aktywności fizycznej. Model według normy PN-EN 15251 jest stosowany przy ciągłej średniej temperaturze zewnętrznej z przedziału 10-30°C w odniesieniu do górnej granicznej wartości oraz 15-30°C w przypadku dolnej wartości granicznej.

Tabela 3

Dopuszczalne zakresy temperatury według kryterium adaptacyjnego PN-EN 15251 i EN 16798-1 dla trzech kategorii budynków [10, 20, 22]

Kategoria pomieszczeń	Poziom oczekiwań	Dopuszczalne zakresy temperatury według PN-EN 15251	Dopuszczalne zakresy temperatury według EN 16798-1
I	Wysoki	+2°K	+2°K
		-2°K	-3°K
II	Normalny – nowe budynki	+3°K	+3°K
		-3°K	-4°K
III	Dopuszczalny – budynki istniejące	+4°K	+4°K
		-4°K	-5°K

Dostępna i używana do symulacji wersja programu Design Builder 5.0, kompatybilna z nakładką Results Viewer 3.0, zakłada korzystanie z normy PN-EN 15251.

4.2. ANALIZA SYMULACYJNA KOMFORTU CIEPLNEGO WEDŁUG KRYTERIUM ADAPTACYJNEGO ASHRAE ORAZ NORMY PN-EN 15251

Jak już wspomniano, w programie Design Builder można analizować komfort adaptacyjny według kryterium ASHRAE oraz normy PN-EN 15251. W obu przypadkach, w zestawieniu sumarycznym użytkownik dostaje informację podczas ilu godzin warunki termiczne w pomieszczeniu wykraczają poza zakres warunków komfortowych. Dodatkowa nakładka do programu Design Builder Results Viewer umożliwiła szczegółowe zestawienie użytkowych godzin komfortu adaptacyjnego według klucza podanego w tabeli 4.

W tabeli 5 zestawiono obliczone za pomocą nakładki Results Viewer liczby godzin według kryterium adaptacyjnego ASHRAE 55 i normy PN-EN 15251. W osobnym wierszu podano liczby godzin o wartościach pomiędzy 0 i 1. Oznacza to, że tylko określona część tej godziny mieści się w zakresie komfortu adaptacyjnego.

Tabela 4

Interpretacja wyników komfortu adaptacyjnego w programie Design Builder Results Viewer. Opracowanie aut.

Wynik symulacji w Design Builder	Interpretacja wyniku
-1	Nie dotyczy (wyniki nie zostały wygenerowane z uwagi na niespełnione kryteria średniej temperatury zewnętrznej $< 10^{\circ}\text{C}$)
0	Temperatura operatywna poza granicami komfortu adaptacyjnego
1	Temperatura operatywna w granicach komfortu adaptacyjnego

Tabela 5

Liczby godzin według kryterium adaptacyjnego ASHRAE 55 i normy PN-EN 15251. Opracowanie aut.

Wariant symulacji	Wynik symulacji w programie Design Builder	ASHRAE 55 zakres 90% [h]	ASHRAE 55 zakres 80% [h]	PN-EN 15251 Kategoria I (90%) [h]	PN-EN 15251 Kategoria II (80%) [h]	PN-EN 15251 Kategoria III (65%) [h]
Wariant referencyjny	-1	144,0	144,0	24,0	24,0	24,0
	0	140,0	88,0	25,0	0,0	0,0
	1	47,0	90,0	273,0	319,0	320,0
	$0 < h < 1$	13	22	22	1	0
Wariant zmodyfikowany	-1	144,0	144,0	24,0	24,0	24,0
	0	94,0	60,0	7,0	0,0	0,0
	1	91,0	128,0	301,0	320,0	320,0
	$0 < h < 1$	15	12	12	0	0

Różnica pomiędzy liczbą godzin komfortu według kryterium ASHRAE i normy PN-EN 15251 jest znacząca i wynika z odmiennych założeń wyjściowych. Wykorzystane w programie Design Builder podejście według ASHRAE zakłada obliczenie temperatury powietrza zewnętrznego T_{rm} jako średniej ważonej z ostatnich trzydziestu dni, podczas gdy drugie kryterium szacuje wartość temperatury zewnętrznej jedynie na podstawie poprzedzającego okresu pięciodniowego. W wyniku zastosowanej metody obliczone temperatury zewnętrzne, będące podstawą do szacowania granic komfortu adaptacyjnego, różnią się momentami o ponad 50%. Ponadto, w obu podejściach komfortu adaptacyjnego przyjmuje się minimalną obliczoną średnią temperaturę zewnętrzną równą 10°C , dla której generowane są wyniki. W przypadku kryterium ASHRAE prawie 60% godzin z całej liczby 344 h użytkowania budynku nie uwzględniono w analizie z uwagi na niską (poniżej 10°C), uśrednioną z trzydziestu dni wartość temperatury zewnętrznej.

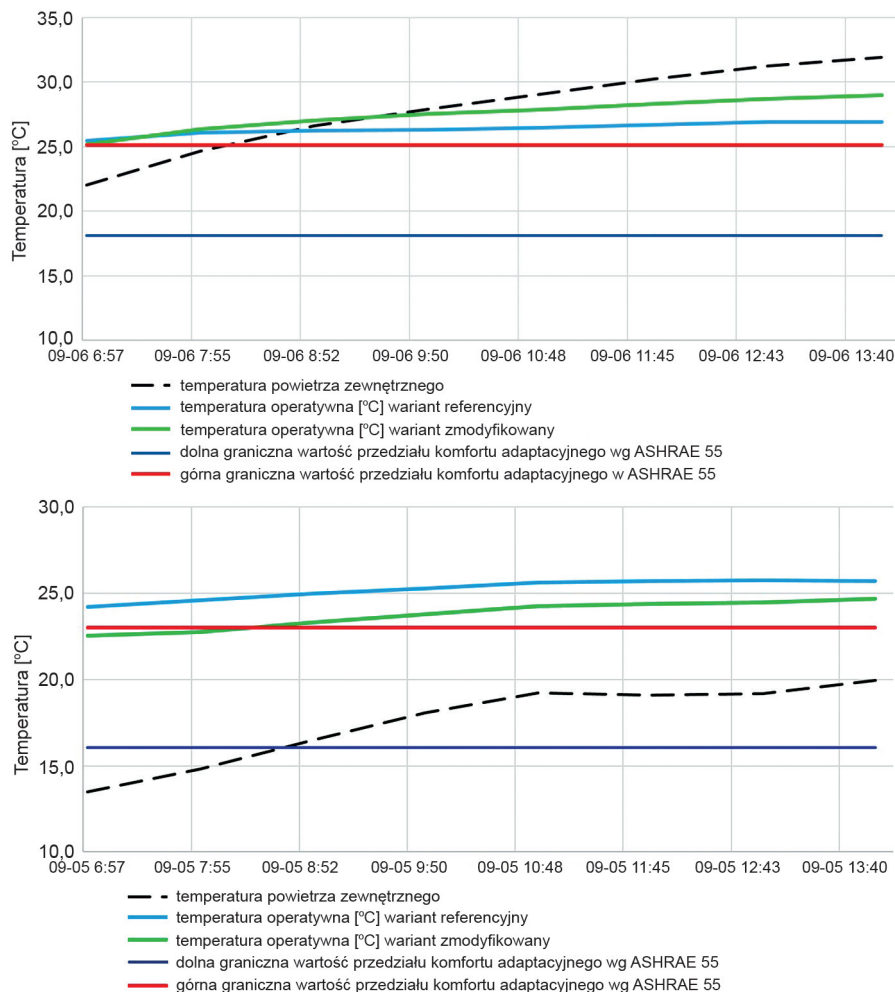
Budynek szkoły w Budzowie nie jest zaliczany do obiektów o wyjątkowo rygorystycznych wymogach środowiska wewnętrznego. W związku z tym przeanalizowano wyniki 80% akceptowalności według kryterium ASHRAE oraz rezultaty otrzymane dla II kategorii budynków według normy PN-EN 15251.

Z obliczeń wynika, że przy kryterium ASHRAE wariant referencyjny charakteryzuje się wyższą o 30% liczbą godzin poza granicami komfortu adaptacyjnego w stosunku do wariantu zmodyfikowanego. Szczegółowe analizy pozwoliły na oszacowanie temperatury idealnej, na podstawie której wyznaczono graniczne wartości temperatury operatywnej. Według ASHRAE idealna temperatura komfortowa w analizowanym dwumiesięcznym okresie mieściła się w wąskim przedziale 21,0-22,4°C, podczas gdy przy PN-EN 15251 zakres temperatury idealnej oscylował pomiędzy wartościami 22,3-27,2°C. Obliczona niska dolna wartość granicznej temperatury operatywnej (od 17,5°C wyznaczona na podstawie wzoru (2)), według ASHRAE, wynika z trzydziestodniowego okresu obliczania średniej temperatury zewnętrznej.

Na ilustracji 5 przedstawiono rozkład temperatury operatywnej oraz graniczne wartości komfortu adaptacyjnego według kryterium ASHRAE dla dwóch wybranych dni, o silnie zróżnicowanych wartościach temperatury zewnętrznej. Ponieważ w obydwu modelach ocena komfortu jest funkcją średniej dziennej temperatury wewnętrznej, to zakresy warunków komfortowych w trakcie pojedynczych dni mogą być zilustrowane liniami poziomymi.

W przypadku wyższej temperatury powietrza zewnętrznego ($> 26^{\circ}\text{C}$) wartości temperatury operatywnej dla wariantu referencyjnego znajdują się poniżej rozkładu temperatury dla wariantu zmodyfikowanego. W okresie niższych temperatur zewnętrznych ($< 20^{\circ}\text{C}$) sytuacja jest dokładnie odwrotna, wariant referencyjny charakteryzuje się wyższymi wartościami temperatur operatywnych. W analizowanym dwumiesięcznym okresie przeważały temperatury niższe (ponad 75% wszystkich godzin to temperatury o wartościach poniżej 20°C), stąd całościowa analiza dyskomfortu według kryterium ASHRAE wypada na niekorzyść wariantu referencyjnego. Należy dodać, że z uwagi na ograniczenia programu dla prostej opcji modelowania w wariantie zmodyfikowanym założony jest stały harmonogram mechanicznej wentylacji, który w okresie niższych temperatur może powodować większe niż w opcji referencyjnej obniżenie temperatury wewnątrz. Chłodzenie za pomocą wymiennika gruntowego zależy ściśle od aktualnego stanu środowiska wewnętrznego i środowiska zewnętrznego, dzięki czemu pozwala utrzymywać stabilniejsze warunki we wnętrzu. Ponadto analiza dotyczy przegrzewania, więc bierze się pod uwagę przede wszystkim okres wysokich temperatur zewnętrznych, w którym korzystniej kształtuje się wariant referencyjny (il. 5).

Z uwagi na wyjątkowo niskie wartości adaptacyjnych temperatur idealnych w podejściu ASHRAE oba przyjęte warianty generowały liczby godzin dyskomfortu na poziomie kolejno 25,5 i 17,4%. W klimacie umiarkowanym, o dużej zmienności temperatury zewnętrznej w ciągu doby, a tym bardziej miesiąca, ocena komfortu ada-

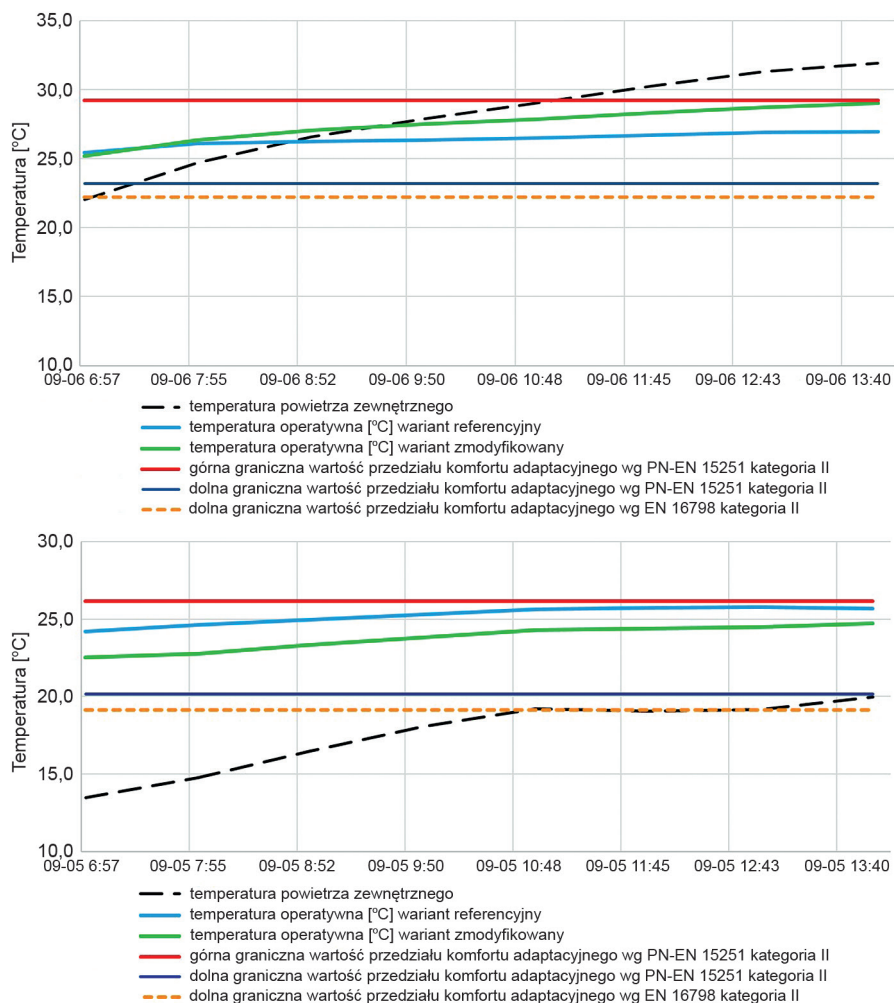


Il. 5. Rozkład temperatury operatywnej dla wybranych z całego okresu symulacji dwóch dni wraz z granicznymi wartościami komfortu adaptacyjnego, według przyjętych kryteriów ASHRAE. Opracowanie aut.

ptacyjnego na podstawie wymagań ASHRAE budzi spore wątpliwości. Długa adaptacja (trzydzieści dni) będzie zapewne korzystnie funkcjonować w typowych miesiącach letnich (lipiec, sierpień), które jako wakacyjne, nie są uwzględniane w modelowaniu szkoły. W związku z niską średnią temperaturą zewnętrzną w pierwszym miesiącu analizy (maj) nie ma tu mowy o przegrzewaniu. Zatem wydaje się, że algorytm obliczeniowy ASHRAE nie jest wiarygodnym sposobem oceny dyskomfortu w okresach wiosenno-letnich.

Analogicznie do powyższych analiz przedstawiono przebieg temperatury operatywnej dla dwóch dowolnie wybranych dni, z uwzględnieniem granicznych prze-

działów komfortu adaptacyjnego, według wymagań normy PN-EN 15251 (il. 6). Jednocześnie na wykresie naniesiono także dolną graniczną wartość temperatury operatywnej według nowych wymagań normy EN 16798 (pomarańczowa przerywana linia). Należy stwierdzić, że modyfikacja przepisów dotycząca dopuszczalnego zakresu temperatury nie wpłynęła na ocenę przegrzewania budynku szkoły. Analizując kategorię II, można także zauważyć, że w obu założonych wariantach nie wystąpiły godziny dyskomfortu. Nawet podczas najgorętszych dni wartości temperatury operatywnej dla przyjętych modeli znajdują się w wyznaczonych przez normę granicach.



Il. 6. Rozkład temperatury operatywnej dla wybranych z całego okresu symulacji dwóch dni wraz z granicznymi wartościami komfortu adaptacyjnego, według przyjętych kryteriów normy PN-EN 15251. Opracowanie aut.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone pomiary oraz symulacje dotyczące komfortu cieplnego w klasie szkolnej podczas okresu letniego umożliwiły sformułowanie następujących wniosków:

1. Zastosowanie do chłodzenia wymiennika gruntowego pozwala na utrzymanie komfortu cieplnego we wnętrzu analizowanej klasy w czasie wysokich temperatur zewnętrznych. Wykorzystanie właściwości gruntu w połączeniu z pompą ciepła wiąże się wprawdzie z dodatkowymi nakładami inwestycyjnymi, ale skuteczność w ograniczaniu dyskomfortu jest znacząca.
2. System wentylacji mechanicznej bez chłodzenia pasywnego nie jest wystarczająco skuteczny, aby ograniczyć przegrzewanie według kryteriów Fangera.
3. Mimo trzykrotnego zwiększenia wysięgu wspornika na elewacji wschodniej oraz zorientowania bryły najdłuższą osią wzdłuż linii wschód–zachód, nie udało się uzyskać warunków komfortu cieplnego w lecie.
4. Uwzględniając adaptację użytkowników do panujących warunków zewnętrznych możliwe jest jednak wyeliminowanie dyskomfortu latem. Nawet bez zastosowania kosztownej instalacji pompy ciepła z wymiennikiem gruntowym realnie jest utrzymanie warunków komfortu cieplnego wewnątrz podczas gorących dni.
5. Odpowiednia orientacja bryły, zgodna z założeniami budownictwa pasywnego, skuteczne osłony zewnętrzne wraz z wydajną i dobrze sterowaną wentylacją nocną mogą być według kryterium komfortu adaptacyjnego równie skuteczne w ograniczaniu przegrzewania co chłodzenie aktywne.
6. Model ASHRAE jest polecany do analizy miesięcy typowo letnich, kiedy wysokie temperatury zewnętrzne utrzymują się przez dłuższy czas (najlepiej trzydziestu ostatnich dni). Kryterium według normy PN-EN 15251 wydaje się bardziej uniwersalne i przydatne w ocenie przegrzewania nawet w krótkich gorących okresach wiosenno-letnich czy letnich.

Uwzględniająca adaptację użytkowników łagodniejsza ocena mikroklimatu pozwala, po spełnieniu odpowiednich wymagań, zaakceptować warunki traktowane według kryterium Fangera jako przegrzewanie. Sposób użytkowania budynków, zgodny z założeniami komfortu adaptacyjnego, jest w naszym kraju dość powszechny, nie stanowi więc dla polskich użytkowników bariery psychologicznej czy zwyczajowej. W efekcie zastosowanie innego sposobu oceny warunków pozwala więc stwierdzić, że proponowane proste, bezinwestycyjne i niewymagające w działaniu znacznych nakładów energii rozwiązania mogą zapewnić komfortowe warunki we wnętrzu analizowanych budynków lub przynajmniej w istotny sposób ograniczyć przegrzewanie wnętrza.

Adaptacyjna metoda określenia komfortu cieplnego ma wprawdzie swoje ograniczenia, ale powinna być stosowana wszędzie tam, gdzie jest to możliwe. Synergia środowiska wewnętrznego, kontrolowanego przez użytkowników w odpowiedzi na panujące warunki zewnętrzne oraz niskiego zużycia energii w budynkach pasywnych, staje się nieodzownym elementem idei zrównoważonego rozwoju. Uwzględniając możliwości termoregulacji organizmu oraz wykorzystując podstawowe zasady wymiany ciepła z otoczeniem, możliwe jest zapewnienie komfortu użytkownika przy minimalnych kosztach eksploatacji.

Większa świadomość i troska o wydajność oraz samopoczucie uczniów w ciągu ostatnich lat wzrosła, co przekłada się na wzmożoną ilość badań obiektów edukacyjnych, w których coraz częściej stosuje się do oceny warunków we wnętrzu podejście adaptacyjne.

W ramach kontynuacji poruszonego problemu przegrzewania planowane są m.in. analizy wpływu masy termicznej oraz nocnej wentylacji na parametry mikroklimatu. W kolejnych pracach planuje się także analizę wpływu różnych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych (stropy aktywowane termicznie, materiały fazowo zmienne) na ograniczanie dyskomfortu latem.

LITERATURA

- [1] ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 (Supersedes ANSI/ASHRAE Standard 55-2013) Includes ANSI/ASHRAE addenda listed in Appendix N, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2017.
- [2] Buratti C., Ricciardi P., *Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms: Correlation between experimental data and mathematical models*, Building and Environment, 44, 2009, 674-687.
- [3] Carlucci S., Pagliano L., *A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings*, Energy and Buildings, 53, 2012, 194-205.
- [4] Conceicao E. Z. E., Gomes J. M. M., Antao N. H., Lucio M. M. J. R., *Application of a developed adaptive model in the evaluation of thermal comfort in ventilated kindergarten occupied spaces*, Building and Environment, 50, 2012, 190-201.
- [5] De Dear R. J., Kim J., Candido C., Deuble M., *Adaptive thermal comfort in Australian school classrooms*, Building Research and Information, 43, 2015, 383-398.
- [6] De Dear R. J., Brager G. S., *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference*, ASHRAE Transactions, 104, 1998, 145-167.

- [7] De Giuli V., Da Pos O., De Carli M., *Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools*, Building and Environment, 56, 2012, 335-345.
- [8] Djongyang N., Tchinda R., Njomo D., *Thermal comfort: a review paper*, Renewable Sustainable Energy Reviews, 14, 2010, 2626-2640.
- [9] Figielek A., Królczyk B., *Budynki pasywne*, WIDP Wielkopolski Dom Pasywny, Poznań 2015.
- [10] FprEN 16798-1 Energy performance of buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, CEN (European Committee for Standardization), Brussels 2018.
- [11] Guidelines for Environmental Design in Schools, Department for Education and Skills, Building Bulletin, 87, 2nd Edition, Version 1, maj 2003.
- [12] Hellwig R. T., Teli D., Schweiker M., Choi J.-H., Lee M. C. J., Mora R., Rawal R., Wang Z., Al-Atrash F., *A framework for adopting adaptive thermal comfort principles in design and operation of buildings*, Energy and Buildings, 205, 2019.
- [13] Józwiak J., Podgórski J., *Statystyka od podstaw*, PWE, Warszawa 2009.
- [14] Kaczmarczyk J., *Metody badania i oceny środowiska cieplnego pomieszczeń*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Architektura, z. 47, 2008.
- [15] Katafygiotou M. C., Serghides D. K., *Thermal comfort of a typical secondary school building in Cyprus*, Sustainable Cities and Society, Vol. 13, październik 2014, 303-312.
- [16] Mendell M. J., Heath G. A., *Do indoor pollutants and thermal conditions in school's influence student performance? A critical review of the literature*, Indoor Air, 15, 2005, 27-52.
- [17] Mishra A. K., Ramgopal M., *A thermal comfort field study of naturally ventilated classrooms in Kharagpur*, India, Building and Environment, Vol. 92, październik 2015, 396-406.
- [18] Nicol F., *TM52 The limits of thermal comfort: avoiding overheating in European buildings*, Oxford Brookes and London Metropolitan Universities, 2013.
- [19] Nicol J., Humphreys M., *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*, Energy and Buildings, 34 (6), 2002, 563-572.
- [20] Olesen B. W., *The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings*, Energy and Buildings, 39, 2007, 740-749.
- [21] Pfafferott J. U., Herkel S., Kalz D. E., Zeuschner A., *Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria*, Energy and Buildings, 39, 2007, 750-757.

- [22] PN-EN 15251, *Kryteria środowiska wewnętrznego, obejmujące warunki cieplne, jakość powietrza wewnętrznego, oświetlenie i hałas* (tłumaczenie angielskiej wersji Normy Europejskiej EN 15251:2007).
- [23] PN-EN ISO 7730:2006, *Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego*.
- [24] Projekt wykonawczy gminnej szkoły podstawowej w Budzowie – Architektura, arch. Bożena Bończa-Tomaszewska z pracowni architektonicznej Bończa-Studio, 2011.
- [25] Šenitková I. J., *Indoor Air Quality and Thermal Comfort in School Buildings*, World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2017), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 95, 2017.
- [26] Singh M. K., Ooka R., Rijal H. B., *Thermal comfort in classrooms: a critical review*, 10th Windsor Conference 2018: Rethinking Comfort, 12-15 kwietnia 2018, Conference Proceedings, 649-668.
- [27] Singh M. K., Ooka R., Rijal H. B., Mahapatra S., Kumar S., Kumar A., *Progress in thermal comfort studies in classrooms over last 50 years and way forward*, Energy and Buildings, 188, 2019.
- [28] Tagliabue L. Ch., Accardo D., Kontoleon K. J., Ciribini A. L. C., *Indoor comfort conditions assessment in educational buildings with respect to adaptive comfort standards in European climate zones*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 410, 2020, 012094, SBE19.
- [29] Wargocki P., Wyon D. P., *Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective*, Building and Environment, 59, 2013, 581-589.
- [30] Yang Z., Becerik-Gerber B., Mino L., *A study on student perceptions of higher education classrooms: impact of classroom attributes on student satisfaction and performance*, Building and Environment, 70, 2013, 171-188.
- [31] Zomorodiana Z. S., Tahsildoosta M., Hafezi M., *Thermal comfort in educational buildings: A review article*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 59, czerwiec 2016, 895-906.

Katarzyna Nowak*, Małgorzata Rojewska-Warchał**

RODZAJ I WIELKOŚĆ PRZESZKLENIA A KOMFORT CIEPLNY W POMIESZCZENIACH BIUROWYCH

THE TYPE AND SIZE OF GLAZING VERSUS THERMAL COMFORT IN OFFICE SPACES

STRESZCZENIE

Obiektem analiz przeprowadzanych w niniejszym rozdziale są pomieszczenia biurowe o przeszkleniach zorientowanych w różnych kierunkach. Symulacje zostały wykonane w programie Design Builder dla zlokalizowanego w klimacie umiarkowanym dwukondygnacyjnego budynku biurowego. Zaprojektowany budynek spełnia wymagania stawiane budynkom „o niemal zerowym zużyciu energii” (NZEB) w Polsce.

Wyniki przeprowadzonych symulacji wykazują, że różnica w temperaturze operatywnej pomiędzy pomieszczeniem wyposażonym w system zewnętrznych żaluzji a identycznym pomieszczeniem bez żaluzji w analizowanym okresie 15.05-15.09 wyniosła 0,5-9,9°C. Stosowanie nocnego chłodzenia, w zależności od intensywności tej wentylacji, pozwoliło na zmniejszenie godzin dyskomfortu nawet o 70%.

Słowa kluczowe: komfort cieplny, przegrzewanie pomieszczeń, elementy zaciniające, chłodzenie nocne

ABSTRACT

The objects of the analyzes carried out by the authors in this chapter are office spaces with glazing oriented in different directions. The simulations were carried out in the Design Builder program for a two-story office building located in a temperate climate. The designed building meets the requirements for “nearly zero energy demand” (NZEB) buildings in Poland.

The results of the simulations carried out show that the difference in the operating temperature between the room equipped with the external blinds system and the identical room without the blinds in the analyzed period between May 15 and September 15 was from 0.5 to 9.9°C. The use of night cooling, depending on the intensity of this ventilation, reduced the hours of discomfort by up to 70%.

Keywords: thermal comfort, space overheating, shading elements, night cooling

* Dr inż. Katarzyna Nowak, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, Politechnika Krakowska.

** Mgr inż. Małgorzata Rojewska-Warchał, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, Politechnika Krakowska.

1. WSTĘP

Zwiększenie efektywności energetycznej budynków jest jednym z najpilniejszych zadań rozwoju społecznego ze względu na skalę zużycia energii w tym sektorze. Jednocześnie konieczne jest zapewnienie wysokich wymagań jakości środowiska wewnętrznego oraz komfortu cieplnego we wnętrzu budynku.

Wiele nowo projektowanych budynków biurowych, użyteczności publicznej charakteryzuje się dużymi powierzchniami przeszklonymi. Pomimo doboru poprawnej izolacyjności poszczególnych elementów bryły budynku nadmierne przeszklenia generują zbyt duże, niepożądane zyski słoneczne, zwłaszcza w okresie letnim. Konsekwencją takich rozwiązań projektowych są niekomfortowe warunki pracy. Problem przegrzewania dotyczy najczęściej okresu letniego, ale występuje również w okresie przejściowym, kiedy nie działają systemy chłodzenia. Efektem takich analiz powinny być propozycje rozwiązań nie tylko instalacyjnych (konieczność chłodzenia), ale i architektoniczno-budowlanych, redukujących efekt przegrzewania.

W tym rozdziale podjęto próbę oceny wpływu efektywności doboru rodzaju i wielkości przeszklenia wraz z zastosowaniem zewnętrznych, ruchomych elementów zacieniających na warunki mikroklimatu w pomieszczeniach biurowych. Pasywne rozwiązania, ograniczające wzrost temperatury w pomieszczeniu, takie jak elementy zacieniające, nie zawsze pozwalają na uzyskanie i utrzymanie komfortowych warunków w całym okresie. Konieczne może być usuwanie nadmiernych zysków ciepła poprzez zastosowanie tzw. chłodzenia nocnego, czyli zastosowanie intensywnej wymiany wentylacyjnej powietrzem zewnętrznym.

Obiektem przeprowadzanych analiz są pomieszczenia biurowe o przeszkleniach zorientowanych w różnych kierunkach. Symulacje zostały przeprowadzone w programie Design Builder dla zlokalizowanego w klimacie umiarkowanym dwukondygnacyjnego budynku biurowego (il. 1, 2). Zaprojektowany budynek spełnia wymagania stawiane budynkom „o niemal zerowym zużyciu energii” (NZEB) w Polsce.

Wyniki przeprowadzonych symulacji wykazują, że różnica w temperaturze operatywnej pomiędzy pomieszczeniem wyposażonym w system zewnętrznych żaluzji a identycznym pomieszczeniem bez żaluzji, w analizowanym okresie 15.05-15.09 wyniosła od 0,5-9,9°C. Stosowanie nocnego chłodzenia, w zależności od intensywności wentylacji, pozwoliło na zmniejszenie godzin dyskomfortu nawet o 70%.

Polityka Unii Europejskiej narzuciła na kraje członkowskie konieczność wprowadzenia nowego standardu budynków, o niemal zerowym zużyciu energii [4, 5]. W Polsce implementacja dyrektywy o charakterystyce energetycznej budynków przekłada się na wymagania dla budynków sformułowane w warunkach techniczno-budowlanych [24]. Projektowanie tego typu budynków wymaga od projektantów szerokiej i interdyscyplinarnej wiedzy. Tematyka uzyskania i utrzymania w pomieszczeniach komfortowych dla użytkownika warunków podejmowana jest w literaturze od wielu

lat [7, 8]. Fanger zaproponował, aby subiektywne odczucia komfortu cieplnego użytkowników pomieszczeń określić za pomocą wskaźników oceny PMV i PPD. Metodologia opracowana przez niego została zaimplementowana do europejskich norm dotyczących oceny komfortu cieplnego pomieszczeń [10, 21, 22]. Zwiększająca się w ostatnich latach konieczność zmniejszenia zużycia energii w celu zarówno ogrzewania, jak i chłodzenia zachęca projektantów i badaczy do coraz dokładniejszych analiz dotyczących zapewnienia komfortu cieplnego. Badania są przeprowadzane w kierunku doskonalenia modelu komfortu [9, 28] poprzez liczne badania eksperymentalne nie tylko w laboratoriach, ale i na obiektach rzeczywistych [15, 27]. Wielu badaczy łączy komfort cieplny do modeli jakości środowiska wewnętrznego, uwzględniając dodatkowo komfort akustyczny i oświetleniowy, proponując modyfikacje [13, 16, 19, 20].

Reasumując, niskie zużycie energii nie może być jedynym kryterium projektowania. Mikroklimat przestrzeni wewnętrznej jest połączonym efektem procesu projektowania, wznoszenia i użytkowania poszczególnych pomieszczeń. Na komfort cieplny wpływa aktywność człowieka, izolacja odzieży i parametry środowiskowe, takie jak temperatura powietrza, średnia temperatura promieniowania, prędkość przepływu powietrza i wilgotność względna. Ocena komfortu cieplnego opiera się na wskaźnikach PMV (ang. *Predicted Mean Vote*) i PPD (ang. *Predicted Percentage of Dissatisfied*).

Korzystając z wiedzy, że środowisko wewnętrzne oddziałuje na zdrowie, wydajność i komfort użytkowników, a w konsekwencji może poprawić ogólną efektywność pracy i nauki, w normach [21, 22] wprowadzono sposób określania i stosowania kryteriów projektowych do obliczania energii i całorocznej oceny wewnętrznego środowiska cieplnego.

W pracy podjęto tematykę wpływu zewnętrznych elementów zaciemniających na warunki komfortu cieplnego w pomieszczeniach o dużej powierzchni przeszkleń. Instalacja popularnych obecnie, energooszczędnych okien w budynkach prowadzi do sytuacji, w której w ujęciu rocznym zyski ciepła przez okna przekraczają straty. Współczesną architekturę budynków użyteczności publicznej oraz biurowców charakteryzuje często duże przeszklecie elewacji. Takie rozwiązanie nawet w umiarkowanej strefie klimatycznej, w jakiej usytuowana jest Polska, szczególnie dla elewacji południowej i zachodniej, generuje bardzo intensywne zyski słoneczne w pomieszczeniach.

W wielu publikacjach pojawiają się algorytmy i wskazówki o doborze wielkości powierzchni przeszkleń w zależności od rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych oraz lokalizacji [1, 12, 14]. Często jednak w projektowaniu architektonicznym istotniejsza jest wizja twórcza i efekt wizualny projektu. Narzucanie przez badaczy zastosowania małej powierzchni elementów przeszklonych w elewacjach często nie jest respektowane przez projektantów i inwestorów.

W niniejszym rozdziale przeanalizowano studium przypadku obliczania zapotrzebowania na energię do chłodzenia dla pomieszczeń biurowych w okresie 15.05-15.09.

Pytania badawcze postawione dla badanego przypadku to:

- W jaki sposób w klimacie umiarkowanym w przeszklonych pomieszczeniach zyski słoneczne mogą kształtować warunki komfortu cieplnego?
- Czy zastosowanie zewnętrznych urządzeń zacieniających w przeszklonych pomieszczeniach jest wystarczającym rozwiązaniem, aby utrzymać warunki komfortowe dla użytkowników?
- Czy zastosowanie wentylacji nocnej w budynku jest konieczną metodą ograniczającą zapotrzebowanie na energię do chłodzenia pomieszczeń?

2. PRZEDMIOT OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH

Norma Europejska 16798, *Charakterystyka Energetyczna budynków – parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej z uwzględnieniem jakości powietrza w pomieszczeniu, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki* [22], została opracowana w celu spełnienia wymagań dyrektywy EPBD 2010/31/UE. Jest częścią szeregu norm mających na celu międzynarodową harmonizację metodologii oceny charakterystyki energetycznej budynków, zwaną zestawem norm EPB.

Obliczeniowe zapotrzebowanie na energię w budynkach jest w znacznym stopniu zależne od przyjętych projektowych parametrów środowiska wewnętrznego. Wartości przyjmowanych parametrów są z kolei zależne od przyjętej kategorii środowiska, która jest związana z poziomem oczekiwań użytkowników. Środowisko wewnętrzne wpływa również na zdrowie, produktywność i komfort mieszkańców. Ostatnie badania wykazały, że koszty złego środowiska wewnętrznego dla pracodawcy, właściciela budynku i całego społeczeństwa są często znacznie wyższe niż koszt energii zużywanej w budynku. Wykazano również, że dobra jakość środowiska wewnętrznego może poprawić ogólną wydajność pracy i nauki oraz zmniejszyć absencję. Ponadto niezadowoleni użytkownicy prawdopodobnie podejmą działania w celu zapewnienia sobie wygody, co może mieć wpływ na zużywaną energię. Istnieje zatem potrzeba określenia kryteriów dla środowiska wewnętrznego dotyczących obliczeń projektowych i energetycznych dla budynków i systemów obsługi budynków.

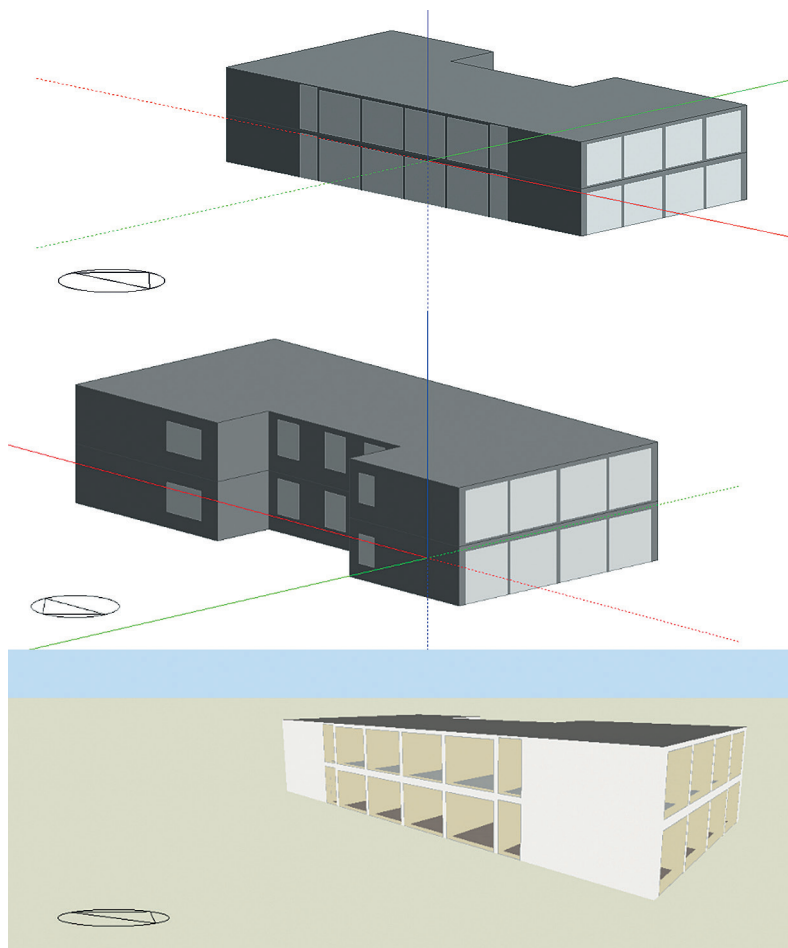
Niniejsza norma określa w jaki sposób należy ustalić kryteria projektowe i zastosować je do wymiarowania systemów. Formułuje jak ustanowić i zdefiniować główne parametry, które mają być wykorzystane jako dane wejściowe do obliczeń energii w budynku oraz krótko- i długoterminowej oceny środowiska wewnętrznego.

Opierając się na wskazaniach zawartych w normie [22], przeprowadzono analizy symulacyjne dla wirtualnego budynku biurowego. Przyjęto, że budynek będzie spełniał następujące kryteria środowiska wewnętrznego:

- kategoria II środowiska termicznego,
- kategoria II postrzeganej jakości powietrza w pomieszczeniach.

Przyjmowanie kategorii II środowiska wewnętrznego jest zalecane dla budynków nowych oraz modernizowanych o normalnym poziomie oczekiwań użytkowników.

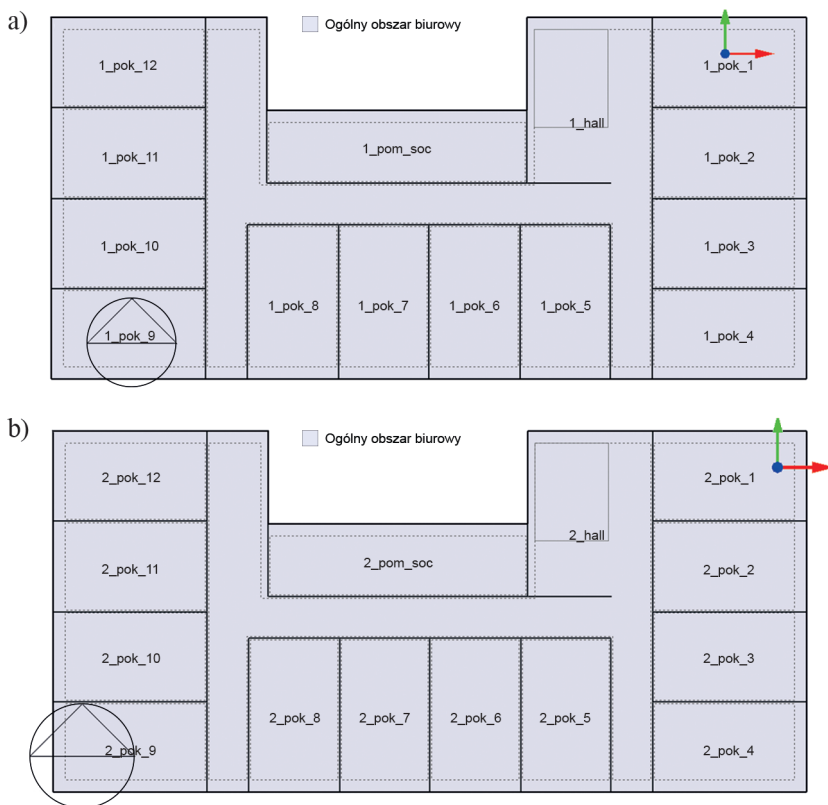
Analizę obliczeniową przeprowadzono dla dwukondygnacyjnego budynku o funkcji biurowej (il. 1) i wymiarach $30,8\text{ m} \times 14,8\text{ m} \times 6,0\text{ m}$. W budynku znajduje się dwanaście pomieszczeń biurowych na każdej kondygnacji o powierzchniach ok. 24 m^2 oraz strefa komunikacji o powierzchni 104 m^2 (il. 2). Okna w każdym z pomieszczeń zorientowane są tylko na jedną stronę świata. Powierzchnia przeszkleń w pomieszczeniach biurowych zajmuje 90% powierzchni ściany zewnętrznej. Północną część budynku stanowi strefa komunikacyjna i pomieszczenia socjalne.



Il. 1. Wizualizacja obiektu (elewacja południowa i północna).
Opracowanie aut.

Budynek charakteryzuje się dobrą izolacyjnością poszczególnych przegród. Spełniają one wymagania narzucone przez warunki techniczne [25]. Współczynniki przenikania ciepła dla przegród nieprzeźroczystych przyjęto zgodnie z wymaganiami budynków o niemal zerowym zużyciu energii:

- ściany zewnętrzne: $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,
- stropodach: $U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,
- podłoga na gruncie: $U = 0,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Il. 2. Rozkład pomieszczeń: a) pierwszej kondygnacji, b) drugiej kondygnacji.
Opracowanie aut.

Pierwszy etap analiz stanowił wpływ doboru izolacyjności elementów przeszklonych i zmienności przepuszczalności promieniowania słonecznego na kształtowanie się warunków komfortu w wybranych pomieszczeniach. Do symulacji przyjęto okna o następujących zestawach szybowych:

- 1) $U_g = 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ $g = 0,35$ LT 57%,
- 2) $U_g = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ $g = 0,35$ LT 57%,

- 3) $U = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ $g = 0,51$ LT 72%,
 4) $U_g = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ $g = 0,51$ LT 72%,

gdzie:

U_g – współczynnik przenikania ciepła dla zestawu szybowego [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$],
 g – całkowity współczynnik przenikalności energii (współczynnik promieniowania słonecznego) [–],

LT – współczynnik przepuszczalności światła [%].

Wszystkie analizy przeprowadzono dla założonego sposobu użytkowania budynku (godziny pracy użytkowników 7.00-18.00 od poniedziałku do piątku), przyjmując, że w pomieszczeniu biurowym mogą pracować trzy osoby.

Zgodnie z zaleceniami podanymi w normie ISO 16798 [22] ilość powietrza wentylacyjnego przyjęto jak dla klasy drugiej. W celu uzyskania odpowiedniej jakości powietrza w takich pomieszczeniach zalecane jest przyjmowanie całkowitego strumienia powietrza wentylacyjnego, zgodnie ze wzorem (1):

$$q_{\text{tot}} = n \cdot q_p + A_R \cdot q_B \quad (1)$$

gdzie:

q_p – strumień objętości powietrza wentylacyjnego przypadającego na osobę; przyjęty 7 l/(s · osoba),

n – liczba osób,

A_R – pole powierzchni podłogi [m^2],

q_B – strumień objętości powietrza wentylacyjnego ze względu na materiały budowlane; przyjęty 0,7 l/(s · m^2).

Gdy budynek nie jest użytkowany, czyli w godzinach 18.00-7.00 oraz w weekendy, zgodnie z normą ISO 16798 [22], przyjęto obniżenie strumienia wentylacji do minimalnej wartości 0,15 l/(s · m^2) powierzchni podłogi we wszystkich pokojach.

Wykonano symulacyjne obliczenia za pomocą programu Design Builder v.3. Korzystając z danych klimatycznych bazy programu Energy Plus, symulacje obliczeniowe wykonano dla lokalizacji obiektu w Krakowie. Celem analiz było wyznaczenie przede wszystkim temperatury operatywnej powietrza w okresie wiosenno-letnim w poszczególnych strefach budynku. Dominującym aspektem obliczeń była ocena komfortu cieplnego. W poszczególnych pomieszczeniach uwzględniano wewnętrzne zyski cieplne związane z funkcją tych pomieszczeń oraz istotnie wpływające na komfort cieplny czynniki, jak: aktywność fizyczna osób przebywających w pomieszczeniach, izolacyjność ich odzieży. Dla pory letniej przyjęto izolacyjność odzieży $clo = 0,5$.

3. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH ANALIZ

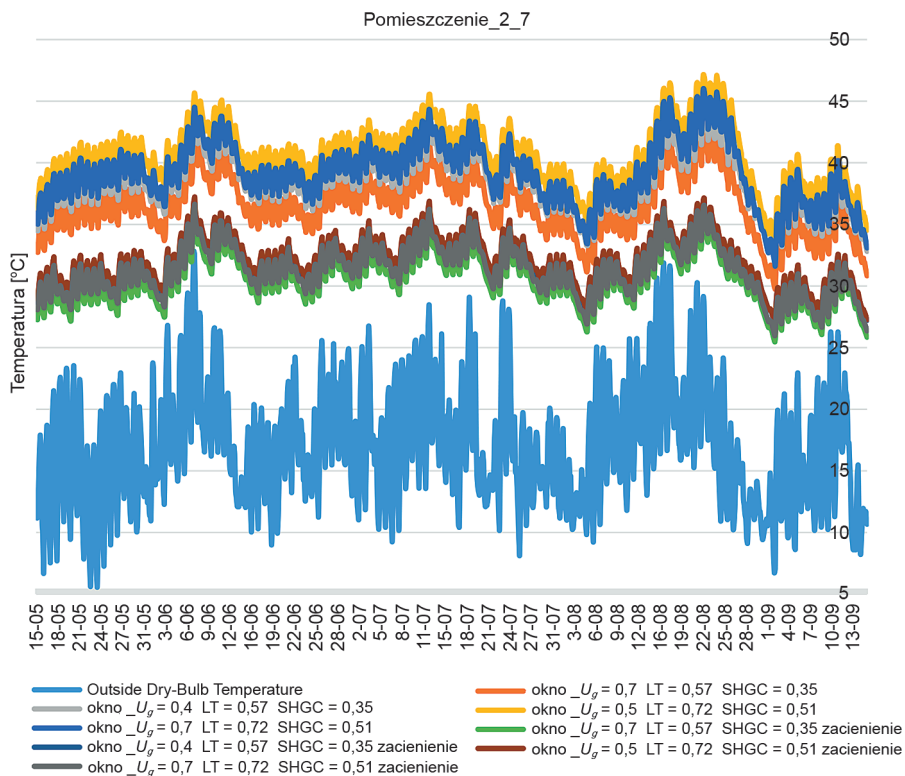
3.1. WPŁYW RODZAJU PRZESZKLEŃ I ZASTOSOWANIA ZEWNĘTRZNYCH ELEMENTÓW ZACIENIAJĄCYCH

Celem pierwszych analiz miało być określenie wielkości wpływu rodzaju przeszkleń na uzyskane warunki komfortu cieplnego w pomieszczeniach biurowych. W wyjściowym budynku rezultaty symulacji, otrzymane dla każdego z czterech rodzajów przyjętych przeszkleń, nie pozwalają na pozytywną ocenę komfortu zarówno w całym budynku, jak i w poszczególnych jego strefach. W analizowanym okresie (15.05-15.09) pojawiają się dni, kiedy wskaźnik komfortu PMV osiąga chwilowe wartości znacznie powyżej 5. Takie warunki mikroklimatu panującego w budynku zdecydowanie przekraczają optymalną dla okresu lata temperaturę 26°C oraz zalecaną wartość wskaźnika $-0,5 < \text{PMV} < +0,5$ (il. 3). Projektowany budynek spełnia standardy budynków nZEB. Zastosowane w analizach rodzaje przeszkleń generowały różnicę w uzyskiwanej temperaturze operatywnej:

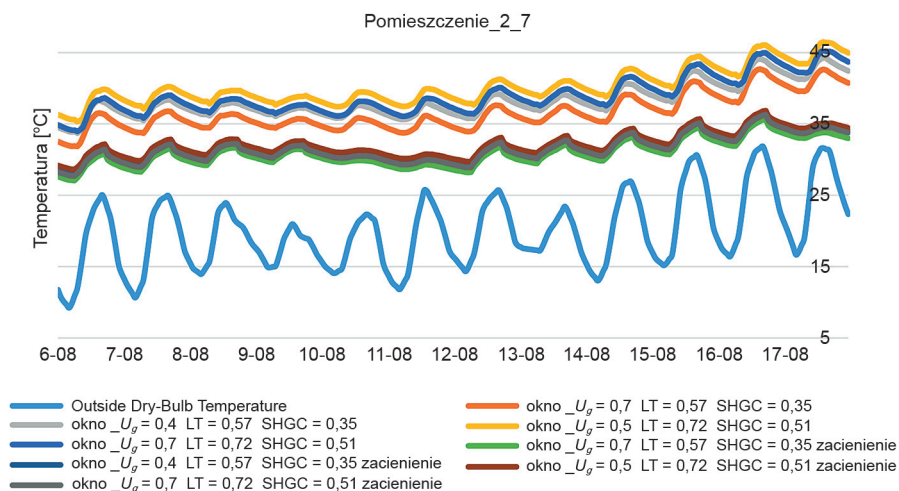
- dla pomieszczeń z przeszklzeniami od strony zachodniej o $2,5$ do $6,2^{\circ}\text{C}$ wyższą dla okien $U_g = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ i $g = 0,51$, względem okien $U_g = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ i $g = 0,35$;
- dla pomieszczeń z przeszklzeniami od strony południowej o $2,6$ do $5,0^{\circ}\text{C}$ wyższą dla okien $U_g = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ i $g = 0,51$, względem okien $U_g = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ i $g = 0,35$.

W kolejnych analizach symulacyjnych nadmierne zyski ciepła od nasłonecznienia zredukowano poprzez zastosowanie zewnętrznych urządzeń zacieniających. Pasywne rozwiązania, ograniczające wzrost temperatury w pomieszczeniu, takie jak elementy zacieniające, nie zawsze pozwalają na uzyskanie i utrzymanie komfortowych warunków w całym okresie, natomiast znacząco ograniczają wzrost nie tylko temperatury powietrza wewnętrznego, ale przede wszystkim odczuwalnej przez użytkowników temperatury operatywnej.

W analizowanym czasie największe obciążenie temperaturą zewnętrzną dla lokalizacji w Krakowie przypada na pierwszą połowę miesiąca sierpnia. Godzinowe wykresy analizy temperatury operatywnej, mogącej wystąpić w pomieszczeniu drugiej kondygnacji z oknami zorientowanymi na stronę południową (pomieszczenie oznaczone jako 2_7), dla rozwiązywanych przypadków przedstawiono dla okresu 06-17.08 (il. 4). Przyjęte zewnętrzne urządzenia zacieniające pozwalają na znaczne obniżenie temperatury operatywnej w pomieszczeniach. Ta redukcja temperatury jest efektywniejsza w przypadku gorących, słonecznych dni i według obliczeń może osiągać wartość: $3,2$ - $10,9^{\circ}\text{C}$ dla pomieszczeń z przeszklzeniami od strony zachodniej oraz $4,0$ - $9,4^{\circ}\text{C}$ dla pomieszczeń z przeszklzeniami od strony południowej.



II. 3. Godzinowy przebieg temperatury operatywnej dla pomieszczenia biurowego (2_7) w okresie 15.05-15.09. Opracowanie aut.



II. 4. Godzinowy przebieg temperatury operatywnej dla pomieszczenia biurowego (2_7) w okresie 06-17.08. Opracowanie aut.

Warunki termiczne uzyskane w pomieszczeniach (w całym analizowanym okresie: 15.05-15.09), nawet po zastosowaniu zewnętrznych żaluzji zaciemniających, nie pozwalają niestety na utrzymanie w trakcie użytkowania budynku przez pracowników założonej klasy komfortu cieplnego.

3.2. WENTYLACJA NOCNA

W klimacie umiarkowanym jedną z najbardziej obiecujących metod ograniczających zapotrzebowanie na energię do chłodzenia pomieszczeń jest stosowanie wentylacji nocnej budynków.

Przepływ powietrza przez budynek w ciągu nocy, gdy powietrze na zewnątrz jest chłodniejsze niż w budynku, obniża temperaturę wewnętrznych powierzchni przegród budynku. Prowadzi to do zwiększenia możliwości akumulowania ciepła w przegrodach i elementach konstrukcyjnych w dniu następnym. W wyniku tych zjawisk wzrost temperatury powietrza w pomieszczeniu, spowodowany zyskami ciepła (wewnętrznymi oraz wywołanymi przez czynniki zewnętrzne), jest znacznie mniejszy niż bez chłodzenia nocnego.

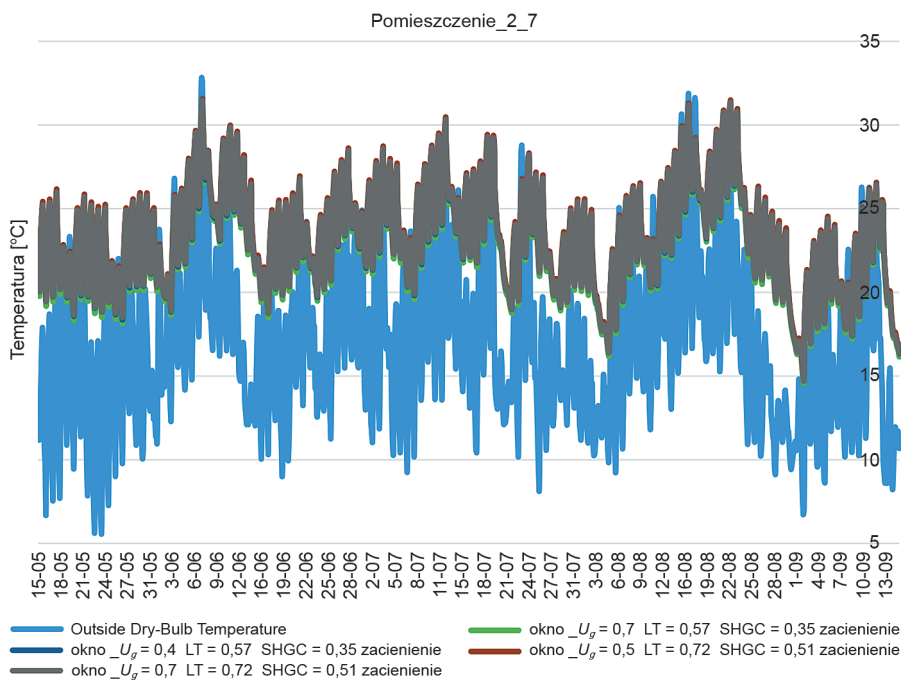
Efektywność wentylacji nocnej zależy od strumienia powietrza wprowadzanego do pomieszczenia z zewnątrz, jego temperatury, a także od powierzchni, grubości, gęstości i przewodności cieplnej elementów akumulujących ciepło.

W przedstawionych w punkcie 2 analizach przyjęto zgodnie z zaleceniami normy [22] strumień wentylacji nocnej o minimalnej wartości $0,15 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ powierzchni podłogi, co daje wartość ok. $0,2 \text{ h}^{-1}$. W publikacji [24] autorzy podają, że zdolność do usuwania zysków ciepła spotykanych w budynkach biurowych może być osiągnięta dopiero przy intensywności wentylacji 5 h^{-1} .

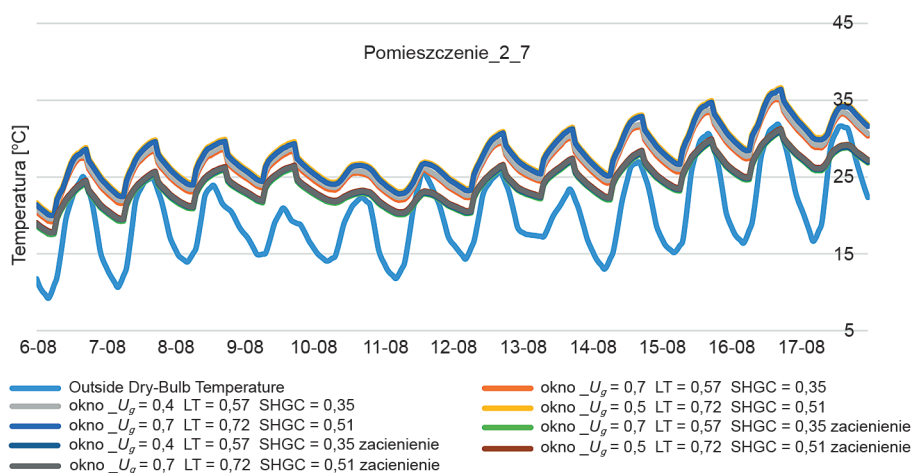
Czynnikiem zmniejszającym efektywność stosowania wentylacji nocnej do pasywnego chłodzenia budynków jest dodatkowe zużycie energii do napędu wentylatorów. W celu ograniczenia zużycia tej energii przyjęto intensywność nocnej wentylacji na poziomie 2 h^{-1} .

W celu zaobserwowania wpływu zwiększonej wentylacji nocnej na możliwość kształtowania mikroklimatu wewnętrznego na il. 5 zestawiono porównawcze przebiegi wskaźnika komfortu i temperatury operatywnej dla wszystkich analizowanych przypadków.

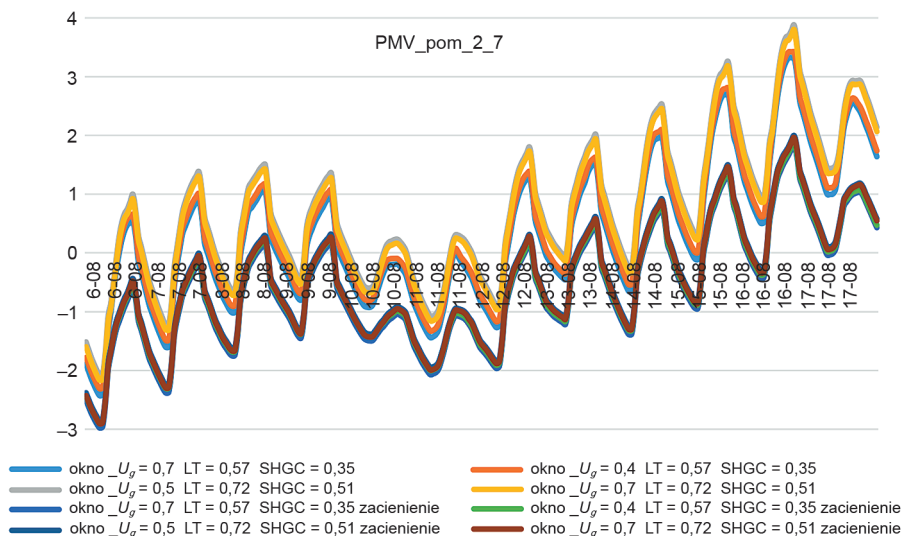
Zaprezentowane wyniki analiz komfortu cieplnego przy intensywnej nocnej wentylacji pozwoliły na obliczenie godzin przegrzewania się pomieszczeń w okresie 15.05-15.09. Dla analizowanego budynku tylko połączenie zewnętrznych elementów zaciemniających, jak i intensywnej nocnej wentylacji pozwala spełnić wymagania związane z dopuszczalną ilością godzin odchyłek dla założonej II kategorii (poniżej 58 h w tygodniu przy miesięcznej ilości dopuszczalnych odchyłek wynoszącej 180 h) [3].



II. 5. Godzinowy przebieg temperatury operatywnej dla pomieszczenia biurowego (2_7) w okresie 15.05-15.09 przy wentylacji nocnej 2 h^{-1} . Opracowanie aut.



II. 6. Godzinowy przebieg temperatury operatywnej dla pomieszczenia biurowego (2_7) w okresie 06-17.08 przy wentylacji nocnej 2 h^{-1} . Opracowanie aut.

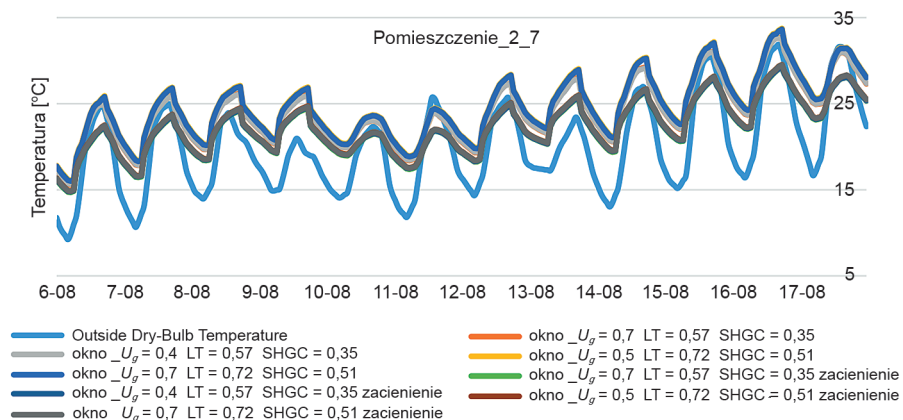


Il. 7. Godzinowy przebieg wskaźnika PMV dla pomieszczenia biurowego (2_7) w okresie 06-17.08 przy wentylacji nocnej 2 h^{-1} . Opracowanie aut.

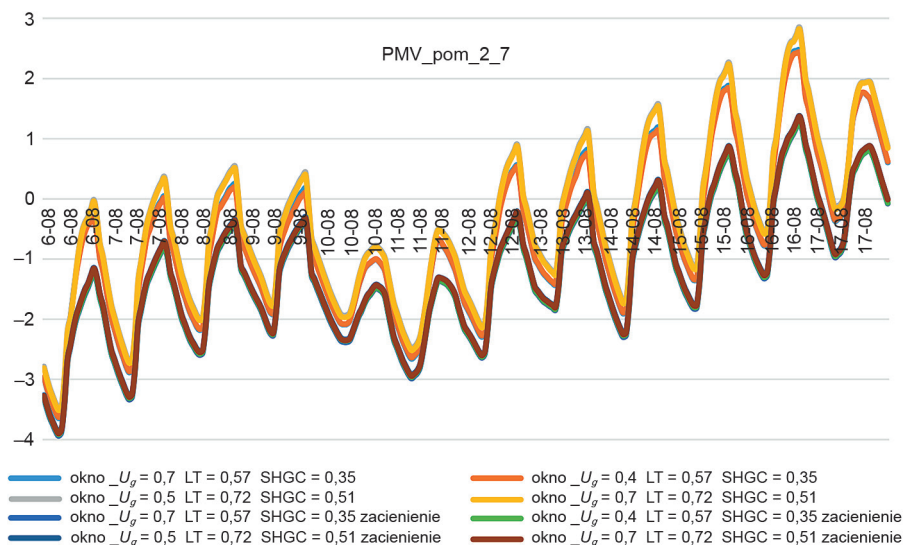
W publikacji [26] autor podaje, że zdolność do usuwania zysków ciepła spotykanych w budynkach biurowych może być osiągnięta dopiero przy intensywności wentylacji 5 h^{-1} . Przyjmując tak intensywną wentylację nocną, można zauważalnie poprawić warunki termiczne w analizowanych pomieszczeniach (il. 8).

W pomieszczeniu o południowej ekspozycji okien (2_7) liczba godzin przegrzewania w całym okresie zmniejszyła się:

- z 240 do 78 przy zastosowaniu zewnętrznych elementów zacięających,
- z 896 do 270 dla okien bez zewnętrznych elementów zacięających.



Il. 8. Godzinowy przebieg temperatury operatywnej dla pomieszczenia biurowego (2_7) w okresie 06-17.08 przy wentylacji nocnej 5 h^{-1} . Opracowanie aut.



Il. 9. Godzinowy przebieg wskaźnika PMV dla pomieszczenia biurowego (2_7) w okresie 06-17.08 przy wentylacji nocnej 5 h⁻¹. Opracowanie aut.

3.3. WIELKOŚĆ POWIERZCHNI PRZESZKLEŃ

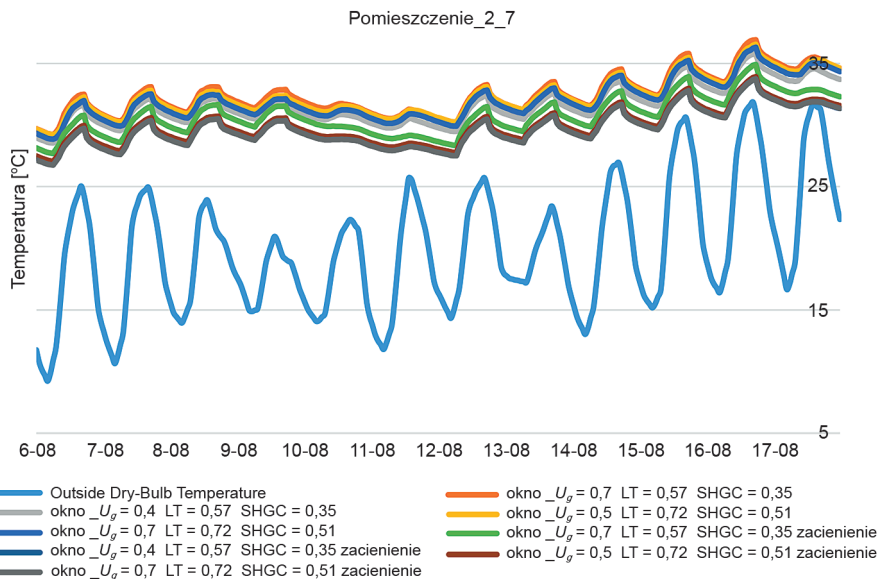
W umiarkowanej strefie klimatycznej zapewnienie komfortu termicznego związane jest z zatrzymywaniem ciepła we wnętrzu budynku zimą oraz z niedopuszczeniem do jego przegrzania się latem, co wymaga złożonych rozwiązań.

Jednym z elementów pozwalającym na ograniczenie strat ciepła w okresie zimowym i jednocześnie redukującym nadmierne zyski zewnętrzne w okresie letnim jest ograniczanie powierzchni przeszklonych w elewacjach zewnętrznych.

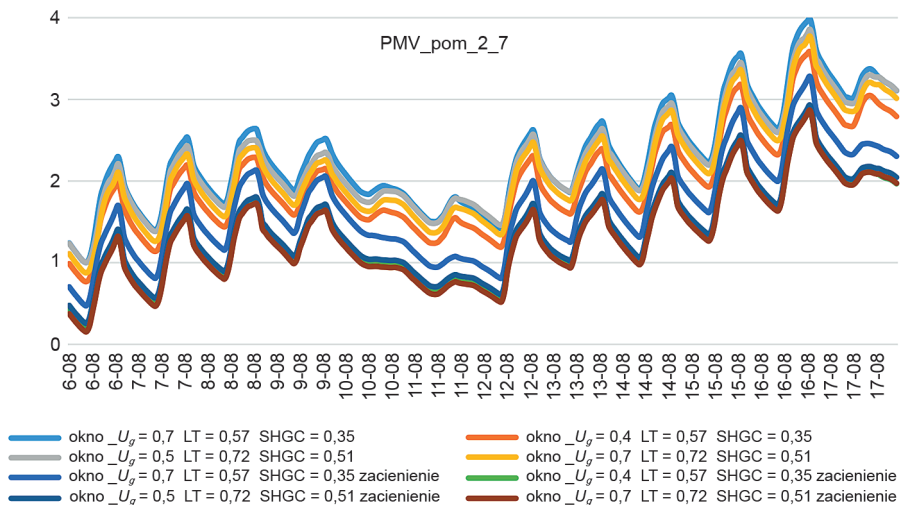
Takie rozwiązania nie zawsze są uwzględniane w procesie projektowania budynków, szczególnie biurowych i użyteczności publicznej.

W celu oceny wpływu wielkości przeszkleń na możliwość redukcji przegrzewania się pomieszczeń w analizowanym budynku zmniejszono okna we wszystkich pomieszczeniach biurowych do minimalnej powierzchni dopuszczonej w warunkach technicznych. Zgodnie z paragrafem 57: „w pomieszczeniu przeznaczonym na pobyt ludzi stosunek powierzchni okien, liczonej w świetle ościeżnic, do powierzchni podłogi powinien wynosić co najmniej 1:8” [25]. Przyjęta powierzchnia okien stanowi około 1/3 powierzchni przyjmowanej w bazowych analizach.

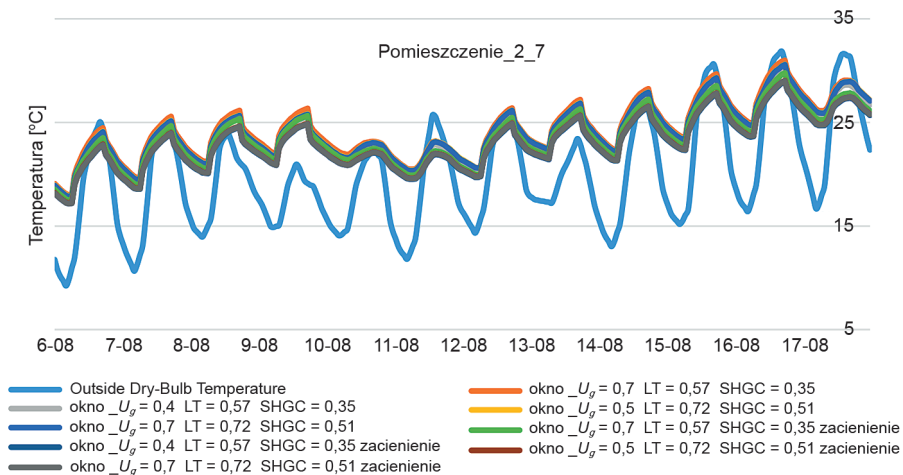
Wyniki uzyskane z symulacji, przy minimalnej rekomendowanej wymianie wentylacyjnej w okresie nocnym, nie pozwalają niestety na pozytywną ocenę warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach biurowych w czasie jego użytkowania.



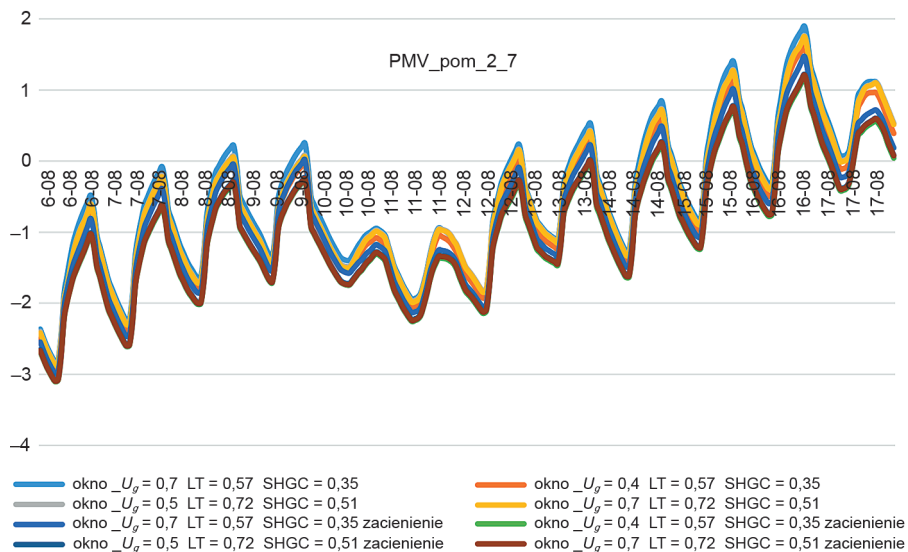
II. 10. Godzinowy przebieg temperatury operatywnej dla pomieszczenia biurowego (2_7) o zmniejszonej powierzchni okien w okresie 06-17.08 przy minimalnej wentylacji nocnej. Opracowanie aut.



II. 11. Godzinowy przebieg wskaźnika PMV dla pomieszczenia biurowego (2_7) o zmniejszonej powierzchni okien w okresie 06-17.08 przy minimalnej wentylacji nocnej. Opracowanie aut.



II. 12. Godzinowy przebieg temperatury operatywnej dla pomieszczenia biurowego (2_7) o zmniejszonej powierzchni okien w okresie 06-17.08 przy wentylacji nocnej 2 h^{-1} . Opracowanie aut.



II. 13. Godzinowy przebieg wskaźnika PMV dla pomieszczenia biurowego (2_7) o zmniejszonej powierzchni okien w okresie 06-17.08 z zastosowaniem wentylacji nocnej 2 h^{-1} . Opracowanie aut.

Natomiast już zastosowanie wentylacji nocnej o intensywności 2 h^{-1} pozwala na spełnienie wymagań związanych z dopuszczalną ilością godzin odchyłek dla założonej II kategorii (poniżej 58 h w tygodniu przy miesięcznej ilości dopuszczalnych odchyłek wynoszącej 180 h) [3]. Te wymagania zostają spełnione zarówno dla rozwiązania z zastosowanymi żaluzjami zewnętrznymi, jak i dla rozwiązania bez jakichkolwiek zewnętrznych elementów zacieniających.

W pomieszczeniu o południowej ekspozycji okien (2_7) całkowita liczba godzin przegrzewania w całym okresie wyniosła:

- 95 przy zewnętrznych elementach zacieniających,
- 192 bez zewnętrznych elementów zacieniających.

Przy tak ograniczonej powierzchni przeszkleń najkorzystniejsze wyniki uzyskiwane są dla okna o wyższej izolacyjności: $U_g = 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ i $g = 0,35$. Dla elewacji o wysokim wskaźniku przeszkleńa mniejsze ilości godzin przegrzewania uzyskiwano dla okien $U_g = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ i $g = 0,35$.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona symulacja parametrów powietrza w budynku bez mechanicznego chłodzenia, ale z wentylacją nocną wykazała, że rozwiązanie to, w zależności od intensywności, może pozwolić na utrzymanie oczekiwanych warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach biurowych w godzinach ich użytkowania.

Przedstawione rozwiązania pozwalają na całkowite wyeliminowanie urządzeń klimatyzacyjnych bądź znaczną redukcję ich wydajności chłodniczej. Dzięki temu zmniejszeniu mogą ulec zarówno koszty inwestycyjne, jak i eksploatacyjne systemu klimatyzacyjnego.

Efektem przeanalizowanego studium przypadku budynku biurowego z dużą ilością przeszkleń, pod kątem uzyskania spełnienia założeń związanych z komfortem cieplnym, a przede wszystkim ochroną przed przegrzewaniem w okresie wiosenno-letnim, są następujące wnioski:

- w przypadku bardzo dobrej izolacyjności obudowy (zarówno przegród pełnych, jak i przeszklonych) zmiany parametrów przeszkleńa w niewielkim stopniu wpływają na zmianę warunków termicznych w pomieszczeniach;
- zastosowanie zewnętrznych elementów zacieniających zapewnia znaczne ograniczenie zysków w pomieszczeniach, ale nie pozwala zapewnić akceptowalnych warunków komfortu w całym analizowanym okresie użytkowania;
- zastosowanie intensywnego chłodzenia w okresie nocnym umożliwia znaczące ograniczenie godzin przegrzewania. Takie rozwiązanie daje najbardziej efektywne wyniki w połączeniu z zastosowaniem pasywnych rozwiązań ograniczających zyski zewnętrzne.

Należy pamiętać, że wyniki przedstawione w niniejszym rozdziale są uzależnione od szeregu parametrów analizowanego obiektu i nie można ich w prosty sposób przenosić na inne budynki.

W przypadku budynków o dużej powierzchni przeszkleń uzyskanie oczekiwanych przez użytkowników komfortowych warunków termicznych w okresie letnim zależy od bardzo wielu parametrów. Mogą być one uzyskane właściwie tylko przy sprzężeniu wielu rozwiązań z zakresu: konstrukcji, rozwiązań materiałowych, architektonicznych, fizyki budowli i instalacyjnych. Konieczne jest zintegrowane podejście do projektowania tego typu budynków już na pierwszych etapach projektowania.

Kolejne badania autorów nad analizą komfortu użytkowników pomieszczeń o dużej powierzchni przeszkleń będą związane z doбором rodzaju i właściwości powierzchni przeszklonych w zależności od orientacji względem stron świata.

LITERATURA

- [1] Alwetaishi M., *Impact of glazing to wall ratio in various climatic regions: A case study*, Journal King Saud University – Engineering Sciences, 31, 2019, 6-18, doi: 10.1016/j.jksues.2017.03.001.
- [2] Al-Tamimi N. A., Fadzil S. F. S., *The potential of shading devices for temperature reduction in high-rise residential buildings in the tropics*, Procedia Engineering, 2011, 273-282, doi:10.1016/j.proeng.2011.11.2015.
- [3] CEN/TR 16798-2 – Energy performance of buildings – Part 2: *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics* – Module M1-6 – Technical report – Interpretation of the requirements in EN 16798-1.
- [4] Directive 2002/91/UE, 2002.
- [5] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
- [6] Evola G., Gullo F., Marletta L., *The role of shading devices to improve thermal and visual comfort in existing glazed buildings*, Energy Procedia, 2017, 346-355, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.543.
- [7] Fanger P. O., *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*, McGraw-Hill, Nowy Jork 1972.
- [8] Fanger P. O., *Analysis and Applications in Environmental Engineering*, McGraw-Hill, Nowy Jork 1970.
- [9] van Hoof J., Mazej M., Hensen J. L. M., *Thermal comfort: research and practice*, Frontiers in Bioscience, 15 (2), 2010, 765-788, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20036845> (dostęp: 3 maja 2020).

- [10] ISO Standard 7730, *Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, International Organization for Standardization, 2005.
- [11] Kisilewicz T., *Passive control of indoor climate conditions in low energy buildings*, Energy Procedia, 78, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.113.
- [12] Kisilewicz T., *Wpływ izolacyjnych, dynamicznych i spektralnych właściwości przegród na bilans cieplny budynków energooszczędnych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008.
- [13] Lai A. C. K., Mui K. W., Wong L. T., Law L. Y., *An evaluation model for indoor environmental quality (IEQ) acceptance in residential buildings*, Energy and Buildings, 41, 2009, 930-936, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.03.016.
- [14] Lin Y., Zhou S., Yang W., Li C. Q., *Design optimization considering variable thermal mass, insulation, absorptance of solar radiation, and glazing ratio using a prediction model and genetic algorithm*, Sustainability, 10, 2018, doi: 10.3390/su10020336.
- [15] Mihlayanlar E., Öztuna S., Büyükkakin K., *Investigation of Thermal Comfort Conditions in Higher Education Facilities: A Case Study for Engineering Faculty in Edirne*, TEM Journal, 6, 2017, 71-79, doi: 10.18421/TEM61-10.
- [16] Nimlyat P. S., *Indoor environmental quality performance and occupants' satisfaction [IEQPOS] as assessment criteria for green healthcare building rating*, Building and Environment, 144, 2018, 598-610, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.09.003.
- [17] Ning H., Wang Z., Ren J., Ji Y., *Thermal Comfort and Thermal Adaptation between Residential and Office Buildings in Severe Cold Area of China*, Procedia Engineering, 121, 2015, 365-373, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.1080.
- [18] Nowak K., Nowak-Dzieszko K., Rojewska-Warchał M., *Thermal comfort of the rooms in the designing of commercial buildings*, [w:] *Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation*, SEMC 2013: 5th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cape Town, 2-4 września 2013, 1819-1824.
- [19] Piasecki M., Kostyrko K. B., Pykacz S., *Indoor environmental quality assessment. Part 1: Choice of the indoor environmental quality subcomponent models*, Journal of Building Physics, 41, 3, 2017, doi:10.1177/1744259117702882.
- [20] Piasecki M., Kostyrko K. B., *Indoor environmental quality assessment. Part 2: Model reliability analysis*, Journal of Building Physics, 42, 3, 2018, doi: 10.1177/1744259118754391.
- [21] PN-EN 15251:2012 – wersja polska, <http://sklep.pkn.pl/pn-en-15251-2012p.html> (dostęp: 19 września 2019).
- [22] PN-EN 16798-1:2019-06 – wersja angielska, <http://sklep.pkn.pl/pn-en-16798-1-2019-06e.html> (dostęp: 19 września 2019).

- [23] PN-EN 16798-3:2017-09 – *Charakterystyka energetyczna budynków. Wentylacja budynków. Część 3: Wentylacja budynków niemieszkalnych. Wymagania dotyczące właściwości systemów wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń* (Moduł M5-1, M5-4).
- [24] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 17 lipca 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [25] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 8 kwietnia 2019 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie
- [26] Sowa J., *Wpływ miejskiej wyspy ciepła na efektywność stosowania wentylacji nocnej*, Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, t. VII, 4, 2015.
- [27] Yang L., Yan H., Lam J. C., *Thermal comfort and building energy consumption implications – A review*, Applied Energy, 115, 2014, 164-173, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.10.062.
- [28] Yao R., Li B., Liu J., *A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV)*, Building and Environment, 44, 2009, 2089-2096, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.02.014.

Ryszard Skiba*

WPŁYW ZAKOTWIEŃ TRZPIENIOWYCH NA PRACĘ STATYCZNĄ PŁYT ELEWACYJNYCH Z BETONU GRC

THE INFLUENCE OF PIN ANCHORS ON THE STATIC WORK OF GRC CONCRETE FACADE PANELS

STRESZCZENIE

W niniejszym rozdziale zaprezentowano podstawowe informacje na temat wybranych sposobów mocowania płyt elewacyjnych z betonu GRC (betonowych zbrojonych włóknem szklanym) za pomocą kotwi kamieniarskich i kotew tyłokrętnych. Ze względu na zwiększoną wytrzymałość na zginanie i rozciąganie (w porównaniu ze zwykłym betonem konstrukcyjnym) oraz stosunkowo duże możliwości w kształtowaniu geometrii płyt elewacyjnych, materiał ten staje się coraz popularniejszą alternatywą dla okładzin z kamienia naturalnego. Autor przedstawił przykłady analizy metodą elementów skończonych mocowań w fugach pionowej i poziomej za pomocą kotwi kamieniarskich oraz zakotwień za pomocą kotew tyłokrętnych. Zaprezentowano również ograniczenia modelu 2D w zakresie analizy tego typu zakotwień.

Słowa kluczowe: beton zbrojony włóknem szklanym, GRC, kotwy kamieniarskie, kotwy tyłokrętne

ABSTRACT

This chapter presents basic information on the selected methods of fixing glass reinforced concrete (concrete reinforced with glass fibers, GRC) cladding panels by using steel pin mechanical connectors. This material, due to an increased resistance to tension and bending (as compared to regular concrete) and relatively high potential in geometry modification of the cladding, is becoming an increasingly popular alternative to natural stone claddings. The author demonstrates the examples of a FEM analysis for fixing on stone anchors in horizontal and vertical joint and fixing with a flush type undercut anchor. The limitations of a 2D modelling method are also presented.

Keywords: Glass Fiber Reinforced Concrete, GRC, embedded inserts, stone pin anchor

* Mgr inż. Ryszard Skiba, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, Politechnika Krakowska.

1. WSTĘP

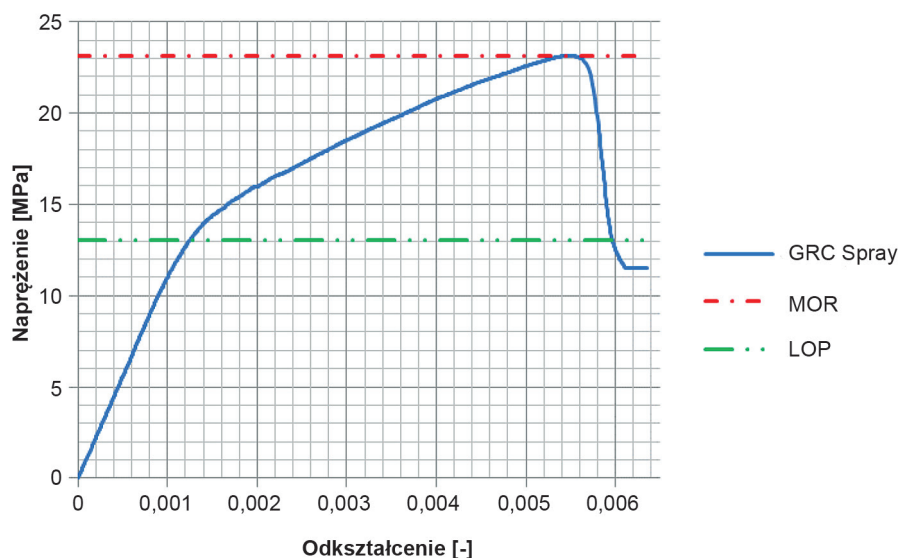
Beton GRC (ang. *Glass Reinforced Concrete*) jest materiałem, który zyskuje coraz większą popularność we współczesnym budownictwie. Jest on często stosowany jako płyty elewacyjne fasad wentylowanych budynków o charakterze reprezentacyjnym. Głównymi elementami wykonywanymi z betonu GRC są m.in. okładziny elewacyjne, gzymsy, elementy architektury wnętrz oraz małej architektury. Jako materiał konstrukcyjny beton GRC może być wykorzystywany do budowy kładek dla pieszych i słupów telekomunikacyjnych [7], lub z dodatkiem PCM (materiałów fazowo zmiennych) może stanowić również regulator klimatu wewnętrznego w budynkach [1].

Beton GRC to materiał kompozytowy powstający w wyniku połączenia mieszanki betonowej z włóknami szklanymi. Odpowiednią wytrzymałość na ściskanie zapewniają wysokie właściwości wytrzymałościowe zapraw cementowych, a zastosowanie włókien pozwala na uzyskanie materiału o zwiększonej wytrzymałości na zginanie i rozciąganie [8]. Zawartość, postać oraz sposób wprowadzania włókien szklanych w GRC silnie wpływa na jego parametry wytrzymałościowe. Włókna dodawane są do mieszanki betonowej metodą natryskiwania oraz metodą wstępnego mieszania – premix.

Metoda produkcji betonu GRC oraz skład mieszanki betonowej dobierane są ze względu na to, jaki element jest produkowany. O właściwościach mechanicznych i fizycznych materiału decydują takie parametry, jak: typ i udział zawartości włókna w mieszance, stosunek piasek/cement, woda/cement, zawartość dodatków i domieszek. Klasę betonu GRC określa się w trójstopniowej skali, w której decydującym parametrem jest jego wytrzymałość na zginanie. Beton wyprodukowany metodą premix charakteryzuje się większą gwałtownością zniszczenia niż beton natryskowy.

Wytrzymałość na zginanie oznacza się przy użyciu dwóch parametrów: LOP i MOR. Parametr LOP określa granicę liniowej proporcjonalności zależności naprężenie–odkształcenie (il. 1). Jest to miara granicy sprężystości dla betonu GRC. MOR jest parametrem wytrzymałości betonu na zginanie, określającym zniszczenie materiału. Jest to maksymalne naprężenie zginające powstające w betonie, wyznaczane podczas czteropunktowego testu zginania próbki [10, 15].

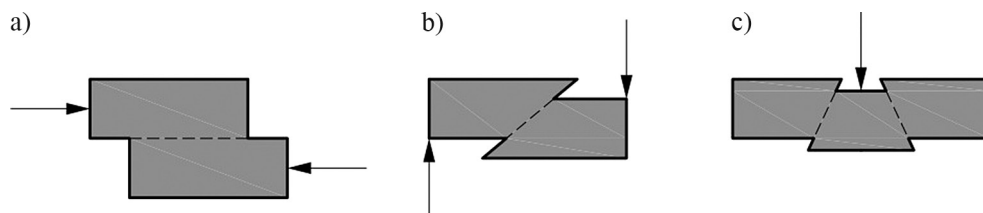
Przy projektowaniu elementów zginanych i ściskanych jako charakterystyczną wytrzymałość w stanie granicznym nośności przyjmuje się wartość MOR₂₈, a w stanie granicznym użyteczności LOP₂₈. Porównanie wartości LOP i MOR betonu wykonywanego różnymi metodami przedstawia tabela 1. Można zauważyć, że jeśli chodzi o wartości LOP, to są one podobne zarówno dla metod wstępnego mieszania, jak i natryskowej. Większe wartości MOR, określające końcową wytrzymałość na zginanie osiągnęte są dla betonu wytwarzanego metodą natryskiwania [11].



Il. 1. Przykładowa krzywa napężenia/odkształcenia dla betonu GRC. Opracowanie aut.

W przypadku projektowania płyt elewacyjnych z betonu GRC istotnym czynnikiem elementów może być wytrzymałość na ścinanie. Dotyczy to w szczególności ryflowanych płyt elewacyjnych oraz zamocowań. W trakcie produkcji włókna w elemencie rozmieszczane są losowo i nie ma konkretnego kierunku wzmocnienia, dlatego rozróżnia się trzy rodzaje ścinania płyt, w zależności od płaszczyzny działania obciążenia.

Wszystkie rodzaje ścinania przedstawiono na il. 2. Ze względu na brak odpowiedniej metodologii w określaniu dopuszczalnych wartości naprężeń ścinających można przyjmować, że wytrzymałość na ścinanie jest równa wytrzymałości na rozciąganie [14]. Instrukcja [8] zaleca ograniczenie naprężeń rozciągających pochodzących od ścinania do 40% wytrzymałości na zginanie LOP28. Zakres przyjmowanych wartości wytrzymałości na ścinanie betonu GRC zawarty jest w tabeli 1.



Il. 2. Schematy trzech typów ścinania elementów z GRC: a) ścinanie wzdłuż warstw, b) ścinanie w poprzek warstw, c) przebicie. Opracowanie aut.

Tabela 1

Wybrane właściwości mechaniczne betonu GRC po 28 dniach. Opracowanie aut.

Właściwość	Metoda produkcji	
	SPRAYED	PREMIX
Granica wytrzymałości MOR28 [MPa]	18-30	5-14
Granica sprężystości LOP28 [MPa]	5-10	5-10
Przebiecie [MPa]	25-35	4-6

Celem rozdziału jest zaprezentowanie najpopularniejszych sposobów mocowania płyt elewacyjnych wykonanych z betonu GRC oraz wskazanie obszarów i stref decydujących o ich nośności.

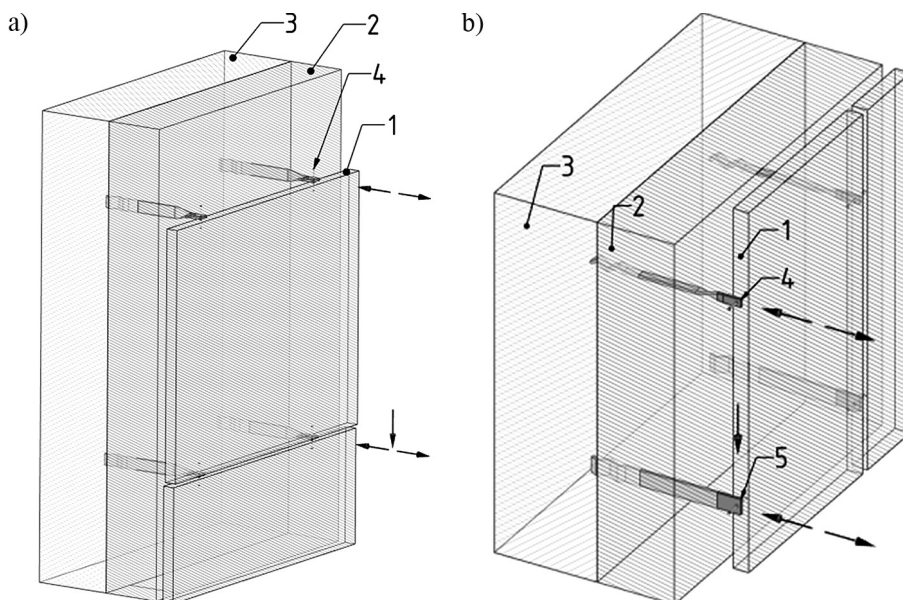
2. METODY MOCOWANIA PŁYT ELEWACYJNYCH

Zamocowania płyt elewacyjnych przenoszą na elementy podkonstrukcji fasady ciężar własny płyt elewacyjnych oraz inne obciążenia związane ze specyfiką materiału płyty i wymaganiami użytkowymi budynku. Najważniejszymi obciążeniami środowiskowymi płyt fasadowych z betonu GRC są: wiatr (parcie, ssanie) [2], zmiany temperatury czy wilgotności (skurcz i pęcznienie) [5, 17]. O doborze ich wymiarów i materiału decydują warunki środowiskowe oraz wysokość budynku. Elementy okładzinowe powinny mieć zdefiniowane podstawowe parametry mechaniczne, m.in. wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości Younga. W zależności od sposobu mocowania należy określić wytrzymałość okładzin na docisk i wyrwanie elementu kotwiącego, działanie sił ścinających i odporność elewacji na obciążenie siłą poziomą. Odporność elementów okładzinowych na uderzenie ciałem twardym i ciałem miękkim definiuje miejsce ich zastosowania. W Europie Środkowej elementy elewacji z GRC najczęściej mocuje się do rusztu za pomocą stalowych bądź aluminiowych łączników mechanicznych. Według [3, 4] najczęściej stosowanymi metodami montażu są mocowania:

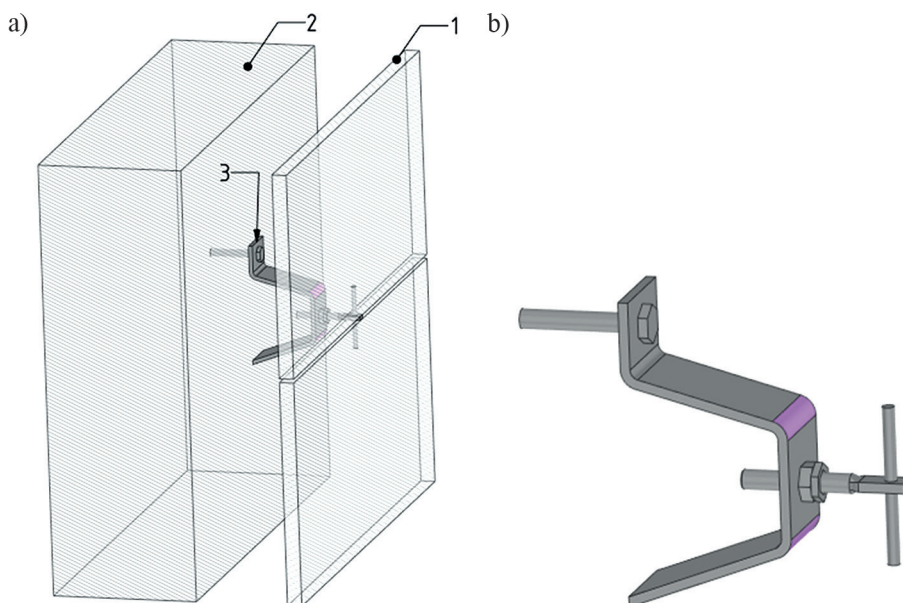
- na kotwach kamieniarskich,
- tyłokrętne.

2.1. MOCOWANIE NA KOTWACH KAMIENIARSKICH

Kotwienie bezpośrednio polega na zamontowaniu płyt elewacyjnych za pomocą kotew ze stali nierdzewnej do warstwy konstrukcyjnej budynku. Ciężar fasady wraz z działającymi na nią obciążeniami jest przekazywany przez łączniki mechaniczne



II. 3a) Kotwienie płyt w fudze poziomej kotwą kamienną: 1 – płyta elewacyjna, 2 – izolacja termiczna, 3 – ściana nośna, 4 – kotwa kamienna, b) kotwienie w fudze pionowej za pomocą kotew kamiennych: 1, 2, 3 – jak powyżej, 4 – kotwa stabilizująca, 5 – kotwa grawitacyjna. Opracowanie aut.

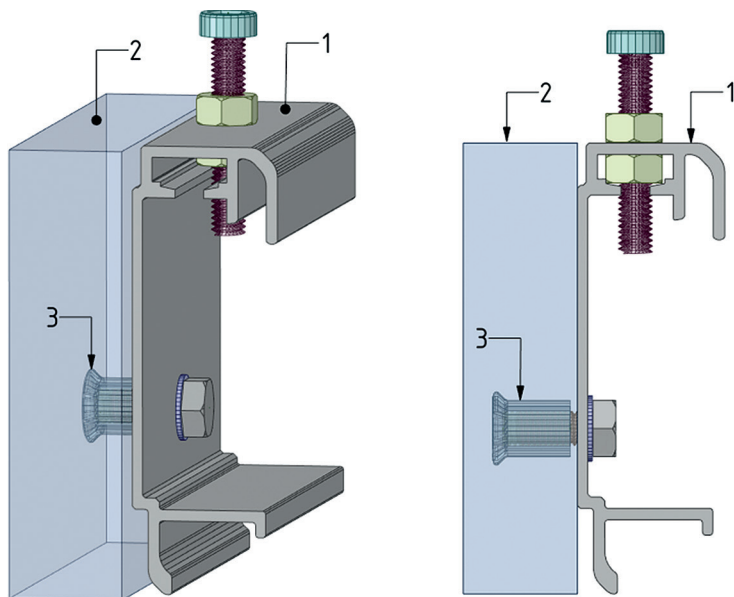


II. 4. Regulowana kotwa mechaniczna: a) 1 – płyta elewacyjna, 2 – ściana nośna, 3 – kotwa regulowana, b) kotwa w powiększeniu. Opracowanie aut.

mocujące elementy okładzinowe do ściany nośnej. W zakresie mocowań bezpośrednich można wyróżnić montaż tradycyjny lub za pomocą łączników mechanicznych. Występują dwa typy kotew: nośne (grawitacyjne) oraz stabilizujące. Kotwy nośne mają za zadanie utrzymanie ciężaru własnego płyty elewacyjnej oraz przenoszą obciążenie od ssania lub parcia wiatru, z obszaru przypadającego na ich zamocowanie. Zakotwienie elementów elewacyjnych powinno być wykonane tak, aby umożliwić swobodną zmianę ich objętości pod wpływem temperatury i skurczu betonu. Rozróżnia się kotwienie w fugach pionowej lub poziomej łączonych elementów. Sposoby kotwienia tradycyjnego w obu fugach przedstawia il. 3. Przykład łącznika mechanicznego pokazano na il. 4.

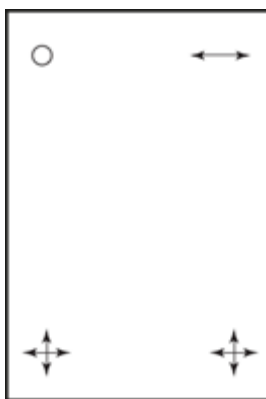
2.2. MOCOWANIA TYŁOWKRĘTNE

Do najnowocześniejszych systemów mocowania okładzin zewnętrznych ścian elewacyjnych należą rozwiązania z niewidocznymi łącznikami, mocującymi okładzinę do konstrukcji wsporczej. Wśród łączników mechanicznych najbardziej zaawansowane technicznie są systemy wykorzystujące łączniki tyłokrętne (tzw. undercut), il. 5. W zależności od producenta łączniki undercut mają zróżnicowaną konstrukcję, ale podstawową zasadą ich działania jest rozporowe mocowanie mechaniczne



Il. 5. Mocowanie tyłokrętne: 1 – szyna aluminiowa, 2 – płyta elewacyjna, 3 – tyłokręt. Opracowanie aut.

we wstępnie przygotowanym otworze w tylnym licu płyty elewacyjnej. Ze względu na wysoką jakość montażu łączniki typu undercut stanowią bardzo popularny sposób montażu płyt okładzinowych. Kluczową kwestią ich stosowania jest przygotowanie otworu (gniazda kotwiącego) w płycie elewacyjnej. Większość producentów proponuje stosowanie specjalnych przyrządów do specjalistycznej techniki obróbki CNC z użyciem dedykowanych do danego rozwiązania frezów wiertarskich. Na pojedynczą płytę przypadają co najmniej cztery punkty podparcia. Łączenie płyt za pomocą połączeń punktowych powinno wykazywać tolerancję oraz umożliwiać ruch związany z odkształceniami spowodowanymi czynnikami zewnętrznymi. Ilustracja 6 przedstawia przykładowe rozmieszczenie zwolnień oraz ograniczeń ruchu w płaszczyźnie płyty elewacyjnej. Kierunek prostopadły do płyty jest zablokowany w każdym punkcie.



Il. 6. Przykładowy schemat mocowania płyty elewacyjnej za pomocą łączników tyłokrętnych. Kierunki zwolnienia stopni swobody na kotwach. Opracowanie aut.

3. ANALIZA WPŁYWU SPOSOBU PODPARCIA PŁYT NA NAPRĘŻENIA W BETONIE GRC

Dokonano szeregu analiz inżynierskich wpływu zróżnicowanych sposobów mocowania elewacyjnych płyt z betonu GRC na ich pracę statyczną. Do symulacji przyjęto płyty o stałej grubości 15 mm dla kotwienia kołkami tyłokrętnymi oraz 40 mm dla płyt mocowanych na kotwach kamieniarskich. Wymiar analizowanej płyty wynosił 1200×800 mm.

3.1. ZAŁOŻENIA MATERIAŁOWE

Do analizy MES przyjęto następujące parametry wytrzymałościowe betonu GRC: $E = 17,6$ GPa; $G = 12$ GPa; $\nu = 0,267$; $\gamma = 22,0$ kN/m³, natomiast do modelowania elementów stalowych: $E = 210$ GPa; $G = 81$ GPa; $\nu = 0,296$; $\gamma = 78,5$ kN/m³. Obliczenia statyczne paneli przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Ze względu na brak informacji na temat zachowania się materiału poza zakresem liniowo-sprężystym zastosowano analizę liniową z dopuszczalnymi naprężeniami przy zginaniu dla betonu klasy 18/9 (MOR/LOP), zgodnie z [12] ustalonymi na poziomie 3 MPa.

3.2. ZAŁOŻENIA OBCIĄŻENIOWE

W przypadku płyt elewacyjnych wykonanych z betonu GRC podstawowym obciążeniem wywołującym zginanie jest obciążenie wiatrem. Do analizy przyjęto wartości charakterystyczne ww. obciążenia na poziomie 1 kN/m², obciążenie od wiatru jako równomiernie rozłożone na całej powierzchni płyty oraz ciężar objętościowy betonu GRC: 22 kN/m³. Zgodnie z zaleceniami [11] analizę statyki płyt wykonano dla kombinacji obciążeń charakterystycznych.

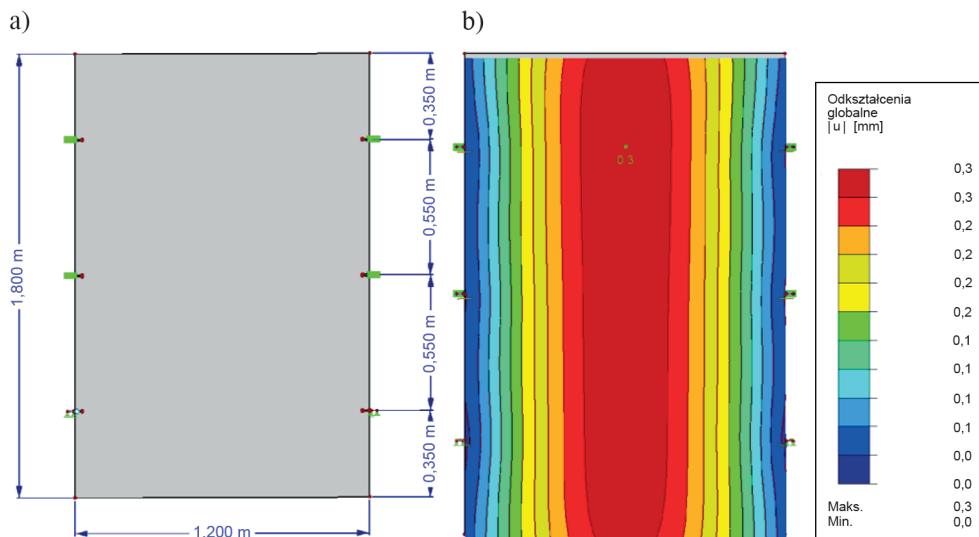
3.3. ANALIZA RÓŻNYCH SPOSOBÓW MOCOWANIA PŁYT GRC

We wszystkich modelach komputerowych zastosowano cztery węzłowe elementy skończone typu SHELL o maksymalnych rozmiarach od 1 mm (w obszarach wokół strefy podparcia) do 10 mm.

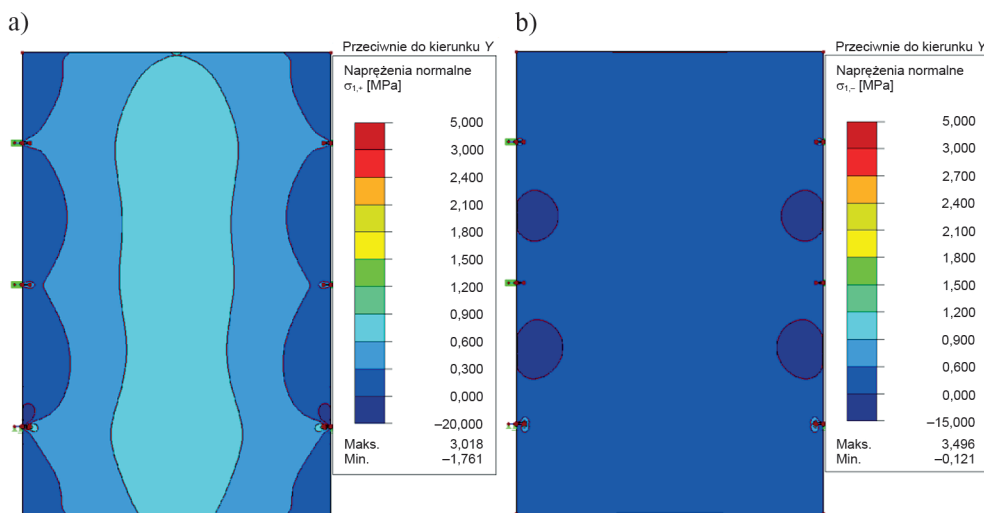
3.3.1. PŁYTA PODPARTA W FUDZE PIONOWEJ

Zamodelowano płytę o stałej grubości 40 mm, podpartą na kotwach kamieniarskich. Trzpienie kotew zamodelowano jako elementy podatne prętowe o średnicy 6 mm i długości 30 mm. Jako wypełnienie otworu zamodelowano zaprawę cementową przenoszącą tylko naprężenia ściskające, pominięto adhezję pomiędzy wypełnieniem a GRC. W kotwach stabilizujących pręty podparto w odległości 5 mm od krawędzi płyty i dalej w odległości 25 mm. Dla kotew stabilizujących zastosowano podpory

przegubowe przesuwne w płaszczyznach pionowej i poziomej, natomiast dla kotew nośnych grawitacyjnych podpory przegubowe z przesuwem poziomym. Przyjęto sześć punktów podparcia, po trzy na każdej stronie płyty. Kotwy grawitacyjne, przenoszące ciężar własny płyty i obciążenie wiatrem, przyjęto w dolnej części płyty. Pozostałe



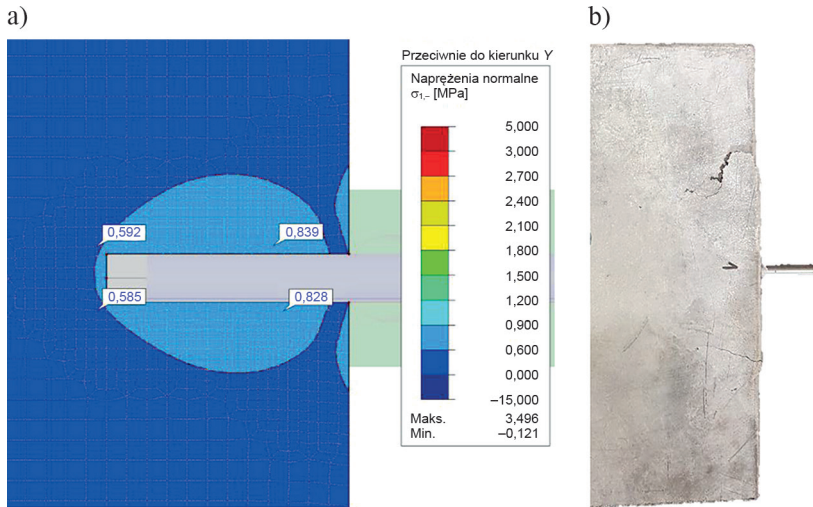
II. 7. Płyta podparta w fudze pionowej: a) wymiary analizowanej płyty, b) ogólne mapy odkształceń. Opracowanie aut.



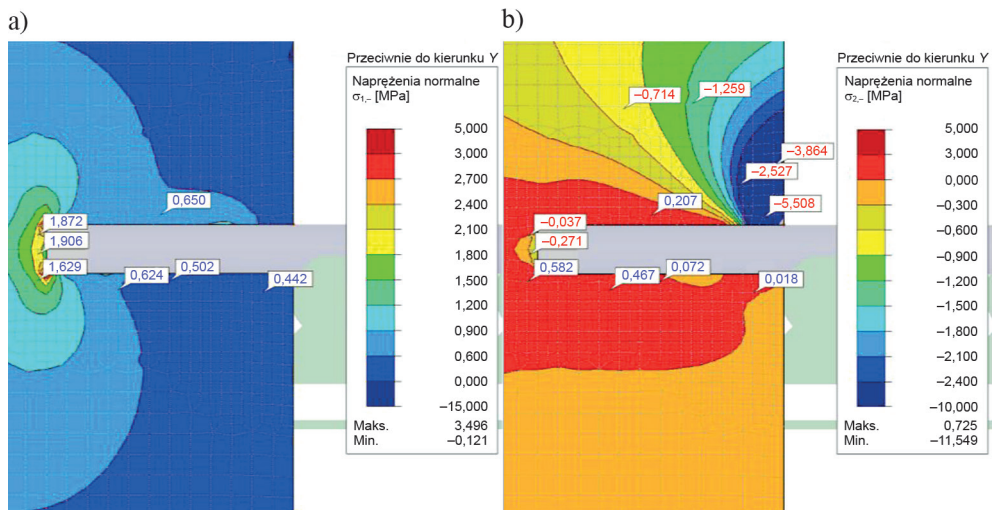
II. 8. Płyta podparta w fudze pionowej: a) ogólne mapy maksymalnych naprężeń rozciągających po zewnętrznej stronie płyty, b) ogólne mapy maksymalnych naprężeń rozciągających po wewnętrznej stronie płyty. Opracowanie aut.

kotwy zamodelowano jako stabilizujące (przenoszące tylko obciążenia poziome od wiatru). Obciążenie od ssania wiatru przyjęto jako równomiernie rozłożone na całej powierzchni płyty.

Geometrię płyty, lokalizację trzpieni wraz z wymiarami, wykresy przemieszczeń przedstawiono na il. 7, a ogólne wykresy naprężeń płyty na il. 8. Szczegółowy rozkład



Il. 9. Kotwie stabilizujące płyty podpartej w fudze pionowej: a) maksymalne naprężenia główne (rozciągające) na powierzchni płyty, b) schemat zniszczenia podparcia. Opracowanie aut.

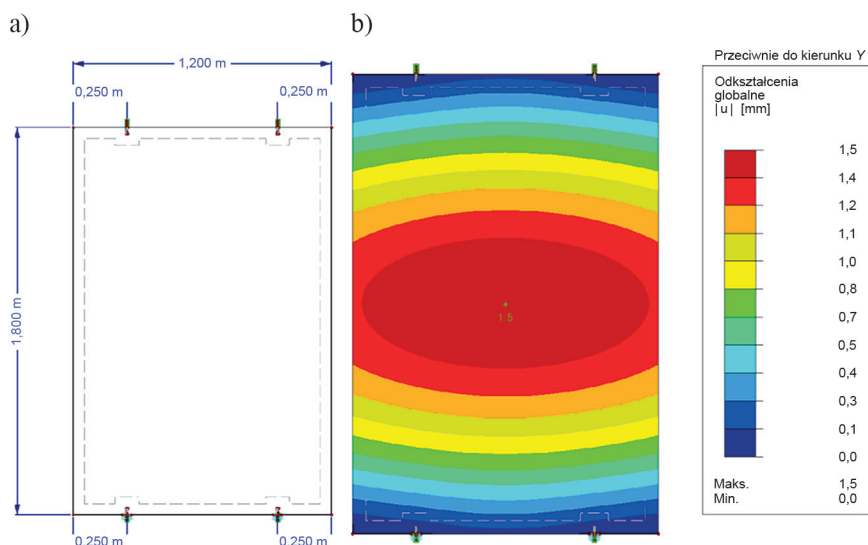


Il. 10. Kotwie nośne płyty podpartej w fudze pionowej: a) maksymalne naprężenia główne (rozciągające) na powierzchni płyty, b) maksymalne naprężenia główne (ściskające) na powierzchni płyty. Opracowanie aut.

naprężeń w obszarze zamocowania kotew stabilizujących i nośnych zilustrowano na il. 9a i 10. Na ilustracji 9b zobrazowano wynik badania wyłamania kołka z płyty, przeprowadzonego zgodnie z [16]. Kształt mapy naprężeń przedstawionej na il. 9a odpowiada postaci zniszczenia zakotwienia.

3.3.2. PŁYTA PODPARTA W FUDZE POZIOMEJ

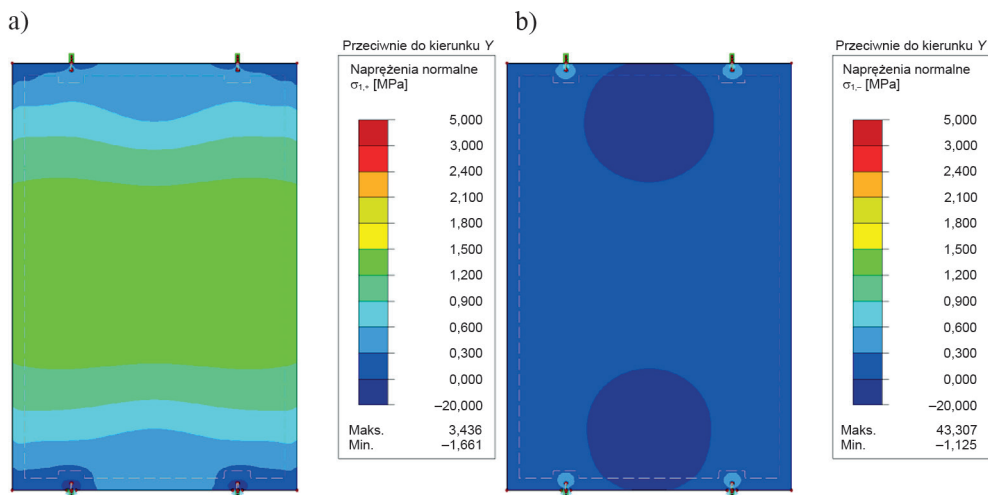
Przedmiotem analizy jest płyta o stałej grubości 40 mm podparta na kotwach kamieniarskich, których trzpienie zamodelowano jako elementy podatne prętowe o średnicy 6 mm i długości 30 mm, stanowiące część podpory przenoszącą obciążenia poziome. W kotwach stabilizujących pręty podparto w odległości 5 mm od krawędzi płyty i dalej dwiema podporami w odległości 12,5 mm. Trzpienie kotew grawitacyjnych podparto na wysokości krawędzi poziomej panelu i dalej co 12,5 mm. Dla trzpieni kotew stabilizujących i grawitacyjnych zastosowano podpory przegubowe przesuwne w płaszczyznach pionowej i poziomej, zablokowano przesuw w płaszczyźnie prostopadłej do płyty. Zamodelowano osadzenie trzpieni na zaprawie cementowej przenoszącej tylko naprężenia ściskające (pominięto adhezję zaprawy do GRC). Znajdujące się w dolnej części płyty płaskowniki o szerokości 40 mm, stanowiące podparcie przenoszące obciążenia grawitacyjne, zamodelowano liniową podporą przegubową przesuwną jednokierunkową, przenoszącą tylko docisk. Przy-



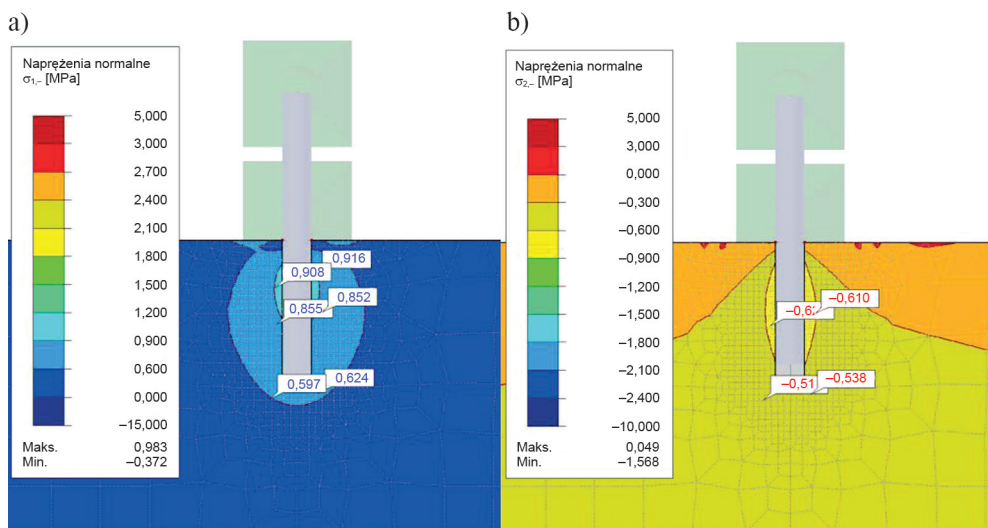
Il. 11. Płyta podparta w fudze poziomej: a) wymiary analizowanej płyty, b) ogólne mapy odkształceń. Opracowanie aut.

jęto cztery punkty podparcia, po dwa na każdej stronie. Obciążenie od ssania wiatru założono jako równomiernie rozłożone na całej powierzchni płyty.

Geometrię płyty i lokalizację trzpieni z wymiarami oraz wykresy przemieszczeń przedstawiono na il. 11, a ogólne wykresy naprężeń w płycie na il. 12.

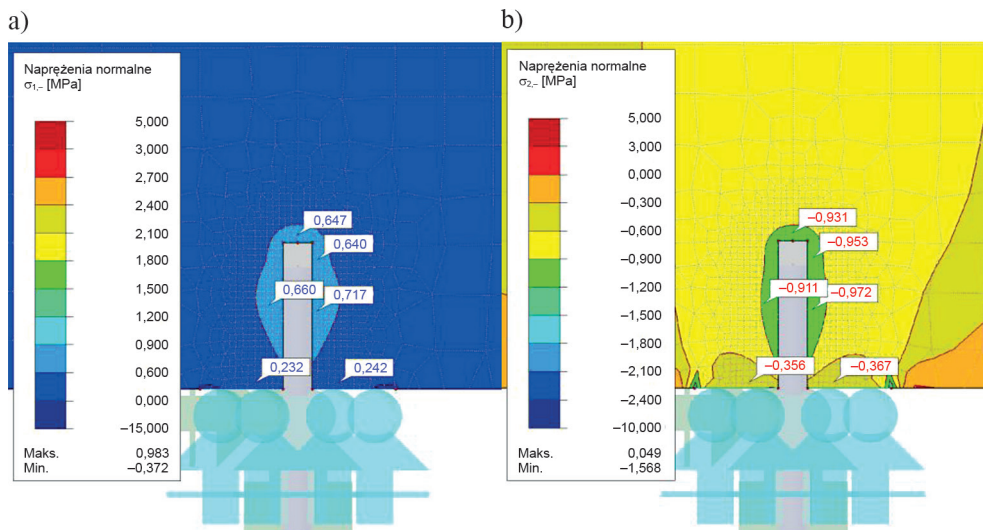


Il. 12. Płyta podparta w fudze poziomej: a) ogólne mapy maksymalnych naprężeń rozciągających po zewnętrznej stronie płyty, b) ogólne mapy maksymalnych naprężeń rozciągających po wewnętrznej stronie płyty. Opracowanie aut.



Il. 13. Kotwie stabilizujące płyty podpartej w fudze poziomej: a) maksymalne naprężenia rozciągające na powierzchni płyty, b) maksymalne naprężenia ściskające na powierzchni płyty. Opracowanie aut.

Szczegółowy rozkład naprężeń w obszarze zamocowania kotew stabilizujących i nośnych przedstawiono na il. 13 i 14.



Il. 14. Kotwie nośne płyty podpartej w fudze poziomej: a) maksymalne naprężenia rozciągające na powierzchni płyty, b) maksymalne naprężenia ściskające na powierzchni płyty.
Opracowanie aut.

3.3.3. PŁYTY MOCOWANE NA KOTWACH TYŁOWKRĘTNYCH

W modelu przyjęto płytę o stałej grubości 15 mm, podpartą punktowo kołkami tyłokrętными. Kotwienie rozmieszczono według schematu przedstawionego na il. 15a. Przyjęto, że w górnym rzędzie na skrajach znajdują się kotwy nośne, z czego jedna ma zablokowane przesuwu poziomy i pionowy, a druga ma tylko blokadę przesuwu pionowego. Pozostałe to kotwy stabilizujące ze zwolnieniami w kierunkach pionowym i poziomym. Ogólne wykresy przemieszczenia płyty przedstawiono na il. 15b. Szczegółowy rozkład naprężeń w obszarze zamocowania kotew stabilizujących i nośnych przedstawiono na il. 16.

4. PODSUMOWANIE

Najbardziej popularną metodą mocowania płyt GRC w Europie Środkowej jest mocowanie na kotwach kamieniarskich oraz tyłokrętnych. Jest to podyktowane tradycją stosowania tych metod montażu do płyt elewacyjnych z kamienia naturalnego. Przeprowadzone analizy obliczeniowe wykazały wyższe ryzyko powstawania uszkodzeń płyt mocowanych za pomocą zakotwień kamieniarskich w fudze pionowej i mocowań tyłokrętnych niż zakotwień kamieniarskich mocowanych w fudze poziomej. W przypadku mocowania na kotwach kamieniarskich podstawą do projektowania tych zamocowań są wyniki badań nośności kołka osadzonego w płycie elewacyjnej. Pozwalają one określić doraźną nośność połączenia kołka osadzonego w płycie, poddanego obciążeniom statycznym prostopadłym do płaszczyzny płyty. Oprócz obciążeń prostopadłych zakotwienie nośne przenosi obciążenia ciężarem własnym płyty. Szczególnie niekorzystnie może oddziaływać obciążenie ciężarem własnym w przypadku płyt mocowanych w fudze pionowej (por. il. 10 i 14). Ciężar płyty poprzez oparcie na trzpieniu kotwy zwiększa koncentrację naprężeń w strefie zakotwienia płyt. Efekt ten jest trudny do oszacowania podczas typowych testów laboratoryjnych i można to wykonać jedynie na podstawie analiz numerycznych.

Wyniki analiz płyt mocowanych na kotwach tyłokrętnych wykazały najbardziej niekorzystny efekt koncentracji naprężeń w miejscach podparcia płyty. Do analiz statyki płyty przyjmowano wartości naprężeń odczytywane na obwodzie kołka tyłokrętnego. Średnica gniazd kotwiących, w zależności od producenta zastosowanego łącznika, waha się od 9 do 12 mm. Im większa średnica gniazda kotwiącego, tym większa redukcja efektu koncentracji naprężeń. W projektowaniu tego typu mocowań pomocne mogą być wyniki badań na wyrywanie i ścinanie kotew tyłokrętnych zgodnie z procedurami [6]. Tym niemniej badania te nie wyczerpują pełnego spektrum pracy łączników, ponieważ nie pozwalają na ocenę nośności na przebicie płyt elewacyjnych w punktach ich mocowania.

Zaproponowany model pozwala na bezpieczne projektowanie płyt mocowanych na kotwach kamieniarskich i łącznikach tyłokrętnych. Jednak w celu zwiększenia dokładności analiz obliczeniowych należy zastosować modele 3D płyty elewacyjnej z uwzględnieniem szczegółowych wyników badań laboratoryjnych. Kierunkiem dalszych analiz jest opracowanie metodologii prowadzenia badań oraz szacowania nośności na przebicie płyt elewacyjnych, aby ułatwić ich dobór w procesie projektowym.

LITERATURA

- [1] Basso P., Mililli M., Herrero F. J. M., Sanz R., Casaldiga P., *E2VENT – design and integration of an adaptable module for residential building renovation*, Journal of Facade Design and Engineering, Vol. 5, 2, 2017.
- [2] Byrdy A., Kołaczkowski M., *Environmental impacts on the strength parameters of mineral-acrylic (PMMA/ATH) facade panels*, International Journal of Polymer Science – 2015, Vol. 2015, Article ID 134714.
- [3] Byrdy A., *Point thermal bridges in walls with external stone layer*, Technical Transactions, 3-B/8, 2014, 49-55.
- [4] Byrdy A., Skiba R., *Analysis of static work of GRC concrete cladding panels fixed on pin anchors*, Concrete – Innovations in Materials, Design and Structures: Proceedings of the fib Symposium 2019 held in Kraków, International Federation for Structural Concrete, Kraków 2019, 1499-1506.
- [5] Enfedaque A., Cendón D., Gálvez F., Sánchez-Gálvez V., *Failure and impact behavior of facade panels made of glass fiber reinforced cement (GRC)*, Engineering Failure Analysis, Vol. 18, 7 październik 2011, 1652-1663.
- [6] EOTA, *EAD-330030-00-0601 – Fastener of external wall claddings*, sierpień 2018.
- [7] Ferreira J. G., Branco F. A., *Numerical simulation of GRC mechanical behavior*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, 6, czerwiec 2007, 445-453.
- [8] G. R. C. I. Group, *A Recommended Practice Design, Manufacture and Installation of Glass Reinforced Concrete (GRC)*, sierpień 2006, 1-92.
- [9] G. R. C. I. Group, *Specification for the Manufacture, Curing and Testing of Glassfibre Reinforced Concrete (GRC) Products*, GRC Industry Group of National Precast Concrete Association Australia, 2002.
- [10] GRCA, *Methods of Testing Glassfibre Reinforced Concrete (GRC) Material*, październik 2017.
- [11] GRCA, *Practical Design Guide for Glassfibre Reinforced Concrete (GRC)*, marzec 2018.
- [12] GRCA, *Practical Fixing Guide for Glassfibre Reinforced Concrete (GRC)*, marzec 2018.
- [13] Hanley M., *Designing the GRC facade for the atlantis hotel*, Concrete, Vol. 44, 6, lipiec 2010, 24-26.
- [14] MNL-128-01, *Recommended Practice for Glass Fiber Reinforced Concrete Panels*, PCI (Precast/Prestressed Concrete Institute) and P. C. I. Committee, 2001.
- [15] MNL-130-09, *Manual for Quality Control for Plants and Production of Glass Fiber Reinforced Concrete Products*, PCI (Precast/Prestressed Concrete Institute) and P. C. I. Committee, 312, 2009.

- [16] PN-EN 13364:2002 *Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczanie obciążenia niszczącego przy otworze na kolek.*
- [17] Theodorakopoulos D. D., *Shrinkage behaviour of GRC thin sheets*, Cement and Concrete Composites, Vol. 17, 3, 1995, 229-238.