

dr inż. Anna Dudzińska<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0003-1349-6108

dr inż. arch. Ewelina Panasiuk<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0001-8848-3542

# Sposoby ograniczania przegrzewania budynku szkoły w standardzie pasywnym

## *Ways to reduce overheating in a passive standard school building*

DOI: 10.15199/33.2023.12.14

**Streszczenie.** Instalacja pompy ciepła wraz z wymiennikami gruntowymi korzystnie kształtuje komfort cieplny w pomieszczeniach latem. W artykule sprawdzono, czy zastosowanie w szkole w standardzie pasywnym w Budzowie modyfikacji przyjętych tam rozwiązań konstrukcyjnych i lokalizacyjnych mogłoby wystarczająco ograniczyć przegrzewanie obiektu latem, eliminując w ten sposób potrzebę stosowania systemów chłodzenia. Stosując analizy symulacyjne, w programie Design Builder, rozpatrywano warunki, jakie powstają w przypadku różnych modyfikacji systemów osłon zewnętrznych i wewnętrznych zastosowanych w szkole. Analizie poddano także różne możliwości orientacji wybranej klasy względem stron świata. Dokonano obrotu modelu budynku szkoły, odpowiednio o 90°, 180° i 270°. Symulacje przeprowadzono w okresie dwumiesięcznym, tj. 01.05 – 31.06. Zaprezentowane w artykule wyniki wykazały, iż system wentylacji mechanicznej skutecznie ogranicza przegrzewanie pomieszczeń latem jedynie w połączeniu ze źródłem chłodu w formie gruntowego wymiennika ciepła i pompy ciepła. Pozostałe sugerowane modyfikacje budynku nie są tak efektywne jak chłodzenie gruntowe. W celu obiektywnej oceny warunków komfortu, w artykule zaproponowano odmienny i bardzo prosty sposób szacowania miary dyskomfortu, związanej z przegrzewaniem.

**Słowa kluczowe:** komfort cieplny; przegrzewanie; dyskomfort; pompa ciepła; pasywna szkoła.

**Abstract.** Heat pumps together with ground heat exchangers favorably shape thermal comfort in summer. This study examines whether the use of modifications to the construction and location solutions adopted in a passive standard school building in Budzów could sufficiently reduce overheating in summer, thus eliminating the need for building services. Through simulation in Design Builder, the conditions that arise for various modifications of the exterior and interior insulation systems used in the school were considered. Also analyzed were various possibilities for the orientation of the selected classroom in relation to the cardinal directions. Rotations of the school building model by 90°, 180° and 270° respectively, were done. Simulations were carried out for the two-month period between May 1 and June 31. The results presented showed that the mechanical ventilation system, in combination with a source of cooling in the form of a ground heat exchanger and heat pump, can effectively reduce discomfort in summer on its own. The other suggested modifications to the building, were not as effective as ground cooling. In order to objectively assess comfort conditions, this study proposes a different and very simple way of estimating the measure of discomfort associated with overheating.

**Keywords:** thermal comfort; overheating; discomfort; heat pump, passive school.

**K**omfort cieplny w obiektach edukacyjnych wpływa bezpośrednio na percepcję oraz wydajność uczenia się. Postępujące szybko niekorzystne zmiany klimatyczne wymuszają poszukiwanie odpowiednich rozwiązań technologicznych, pozwalających na projektowanie zrównoważonych i efektywnych energetycznie budynków. W związku z wciąż zmieniającymi się wymaganiami dotyczącymi zużycia energii, problematyka komfortu cieplnego w szkołach w okresie letnim jest coraz częściej

poruszana i analizowana [1 – 9]. Ograniczenie ilości zużywanej energii nie powinno w żaden sposób obniżać poziomu bezpieczeństwa i komfortu użytkowników.

W ciągu ostatnich lat nastąpił wzrost zainteresowania pompami ciepła i gruntowymi wymiennikami ciepła, ale ze względu na duże koszty inwestycyjne, systemy te są nadal stosowane sporadycznie. Wspomniane instalacje korzystnie kształtują komfort cieplny latem, ale też praca pompy ciepła wiąże się ze znacznym wydatkowaniem energii elektrycznej, a przez wysoki współczynnik nakładu zwiększa istotnie zapotrzebowanie na energię pierwotną. Kolejnym aspektem jest ocena środowiskowo-ekologiczna budynków

i współczesne tendencje do możliwie najprostszyc rozwiązań w budownictwie. W związku z tym sprawdzono, czy gdyby w szkole zlokalizowanej w Budzowie, zrealizowanej w standardzie budynku pasywnego, nie zastosowano chłodzenia z gruntu, modyfikacje przyjętych tam rozwiązań konstrukcyjnych i lokalizacyjnych mogłyby ograniczyć przegrzewanie pomieszczeń latem. W celu sprawdzenia skuteczności wybranych rozwiązań porównano tzw. wariant referencyjny, w którym zastosowano chłodzenie z gruntu, z wariantem zmodyfikowanym, uwzględniającym przyjęte modyfikacje. W programie Design Builder przeprowadzono analizę komfortu cieplnego, wykorzystując standardowy

<sup>1)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

<sup>2)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Architektury

\* Adres do korespondencji: anna.dudzińska@pk.edu.pl

wskaźnik Fangera PMV. Następnie oceniono czas trwania przegrzewania, także jego intensywność z wykorzystaniem zaproponowanej przez nas jednowartościowej ważonej miary dyskomfortu.

## Opis szkoły w standardzie pasywnym w Budzowie

Budynek szkoły to dwukondygnacyjny, niepodpiwniczony obiekt o powierzchni ok 800 m<sup>2</sup>, ułożony na osi północ-południe, zlokalizowany w Budzowie na Dolnym Śląsku (fotografia). Głównym materiałem, z którego wykonano ściany, są bloczki silikatowe o grubości 25 cm, charakteryzujące się dużą pojemnością cieplną. Ściany ocieplano styropianem o grubości 32 cm, co pozwoliło na uzyskanie współczynnika przenikania przegród zewnętrznych  $U \approx 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Budynek o konstrukcji mieszanej posadowiono na ławach fundamentowych o grubości 40 cm oraz szerokości 80 i 100 cm. Zastosowano stropy żelbetowe jednokierunkowo zbrojone o grubości 20 cm oraz stropodach o konstrukcji żelbetowej, jednokierunkowo zbrojony, o grubości 25 cm. Pomieszczenia po stronie wschodniej i zachodniej szkoły doświetlono pasmem okien w wymiarach 900 x 1900 mm z dwukomorowymi szymbami zespolonymi. Współczynnik przenikania ciepła okien spełnia warunek  $U \leq 0,8 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ , a współczynnik przepuszczalności całkowitej energii słonecznej (SHGC) jest równy  $g = 0,63$  [10].



Szkoła w standardzie pasywnym w Budzowie  
Passive School Building in Budzow

Fot. archiwum autorek  
Photo author's archive

## Założenia przyjęte w programie Design Builder

W programie symulacyjnym Design Builder utworzono model szkoły. Uwzględniono geometrię obiektu, jego usytuowanie, strukturę przegród, instalację grzewczą, szczegółowe harmonogramy przebywania osób, działania oświetlenia i wszystkich innych systemów instalacyjnych tego budynku. Na podstawie obserwacji podczas przeprowadzanych wcześniej w szkole pomiarów ustalono tempo metabolizmu dzieci na poziomie 108 W/m<sup>2</sup> oraz założono poziom izolacyjności odzieży 0,5, charakterystyczny dla okresu letniego. Natężenie oświetlenia przyjęto na poziomie 300 lux. Do modelowania szkoły założono oświetlenie podwieszane o następujących parametrach:

- znormalizowana gęstość mocy (normalised power density) – 5,0 [W/m<sup>2</sup> – 100 lux];
- udział powietrza powrotnego (return air fraction) – 0,54;
- udział promieniowania (radiant fraction) – 0,42;
- udział promieniowania widzialnego (visible fraction) – 0,18.

W modelowaniu przyjęto, że w godzinach 7.00 – 15.00 korzystano z oświetlenia sztucznego w zależności od potrzeb użytkowników. W analizie uwzględniono zyski od wewnętrznych urządzeń elektrycznych (komputer, drukarka, rzutnik) na poziomie 5 W/m<sup>2</sup>.

W pierwszej kolejności modyfikacji poddano zastosowane w szkole systemy osłon zewnętrznych i wewnętrznych. Ze względu na budzącą duże wątpliwości, wyjątkowo małą długość łamaczy światła równą 0,4 m, zwiększono ich wysięg do 1,24 m i oceniono zasadność przyjętego rozwiązania. Kolejna modyfikacja dotyczyła wpływu rolet wewnętrznych na ograniczenie godzin dyskomfortu. Sprawdzone, czy przesłony wewnętrzne odgrywają istotną rolę w kształtowaniu mikroklimatu wewnątrz i ochronie przed promieniowaniem słonecznym, czy tylko umożliwiają płynną regulację natężenia wpadającego światła w celu zaciemnienia wnętrza i ewentualnej ochrony przed olśnieniem.

Model podstawowy poddano więc kolejnym modyfikacjom:

■ **wariant 1:** wyjściowy (bez modyfikacji); łamacze światła typu Overhangs o wysięgu 0,4 m, rolety zaciemniające usytuowane po wewnętrznej stronie okna, zasłaniane w godzinach użytkowania 7.00 – 15.00, gdy temperatura wewnątrz osiągnie wartość 24°C;

■ **wariant 2:** łamacze światła typu Overhangs o wysięgu 1,24 m, pozostałe założenia jak w wariantcie I;

■ **wariant 3:** łamacze światła typu Overhangs o wysięgu 0,4 m, rolety przez cały czas odsłonięte;

■ **wariant 4:** łamacze światła typu Overhangs o wysięgu 0,4 m, rolety zaciemniające usytuowane po wewnętrznej stronie okna zasłaniane w godzinach użytkowania 7.00 – 15.00, gdy natężenie promieniowania słonecznego >100 W/m<sup>2</sup>.

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 [11]. Budynek szkoły w Budzowie jest realizowany niemal dokładnie na osi północ-południe. W związku ze sprzecznością pomiędzy wytycznymi budownictwa pasywnego a przyjętym w szkole rozwiązaniem, analizie poddano różne możliwości usytuowania wybranej klasy wschodniej względem stron świata. Dokonano obrotu modelu budynku

szkoły odpowiednio o 90°, 180° i 270°. Analizowana klasa wschodnia stawała się więc w kolejnych rotacjach klasą: południową, zachodnią i północną.

W programie modyfikacji budynku szkoły nie uwzględniano zmiany rodzaju materiału konstrukcyjnego przegród i powiększenia w ten sposób pojemności cieplnej wnętrza, ponieważ zastosowany tam materiał wypełniający szkielet konstrukcji to cegła silikatowa o względnie dużej gęstości i przewodności cieplnej.

## Ważona miara dyskomfortu jako narzędzie do szacowania przegrzewania

Norma PN-EN 15251 [12] definiuje na kilka sposobów ocenę ogólnych warunków komfortu cieplnego. Podaje się przykładowo odsetek godzin poza zakresami granicznymi PMV lub temperatury, ewentualnie stosuje kryterium stopniogodzin lub kryterium ważonych PPD. W celu obiektywnej oceny warunków komfortu, w artykule zaproponowano odmienny od wymienionych i bardzo prosty sposób szacowania miary dyskomfortu, związanego z przegrzewaniem. Czas, w którym wartość wskaźnika PMV przekracza określony zakres podczas użytkowania obiektu, mnoży się przez odpowiedni współczynnik ważenia, stosowny do stopnia przekroczenia tego zakresu. W ten sposób można zawrzeć w jednowartościowej ocenie nie tylko czas trwania dyskomfortu, ale także jego intensywność. Szczegółowy algorytm obliczeń kształtuje się następująco:

1) współczynnik ważenia  $k_c$  równy jest 0, gdy PMV mieści się w zalecanym przedziale komfortu cieplnego  $-0,5 < PMV < +0,5$ ;

2) współczynnik ważenia  $k_c$  przyjmuje się zgodnie z tabelą 1, zależnie od tego, o ile przekroczony jest maksymalnie przedział komfortu;

3) sumuje się iloczynowy współczynnik ważenia  $k_c$  i liczby godzin w przypadku wszystkich zakresów; w celu uproszczenia przyjęto, że umowną (nieformalną) jednostką miary jest godzina. Ważone miary dyskomfortu dla przyjętych wariantów oszacowano następująco:

– wariant 1:  $(9 * 1,0) + (0 * 2,0) + (0 * 3,0) = 9,0$  h;

**Tabela 1. Sposób obliczania współczynnika ważenia w przypadku miary dyskomfortu związanej z przegrzewaniem**

*Table 1. Calculating the weighting factor for a measure of overheating discomfort*

PMV	Współczynnik ważenia $k_c$
$-0,5 < PMV < +0,5$	0
$+0,5 < PMV < +1,0$	1
$+1,0 < PMV < +1,5$	2
$+1,5 < PMV < +2,0$	3

– wariant 2:  $(15 * 1,0) + (15 * 2,0) + (2 * 3,0) = 51,0$  h;

– wariant 3:  $(16 * 1,0) + (18 * 2,0) + (4 * 3,0) = 64,0$  h;

– wariant 4:  $(22 * 1,0) + (15 * 2,0) + (11 * 3,0) = 85,0$  h.

## Wyniki analizy komfortu cieplnego

Obliczone godziny komfortu cieplnego i dyskomfortu zestawiono w tabeli 2. Biorąc pod uwagę liczbę godzin w przedziale komfortu cieplnego Fanger'a  $-0,5 < PMV < +0,5$  **najkorzystniej wypada wariant 1 – wyjściowy**, zakładający zgodny z rzeczywistością wysięg łamaczy 0,4 m i opuszczone rolety wewnętrzne. W przypadku, kiedy zwiększono długość aluminiowej osłony zewnętrznej do 1,24 m, liczba godzin w przedziale komfortu zmniejszyła się o 5 h i wyniosła 105 h. Taki sam rezultat uzyskano w przypadku wariantu z odsłoniętymi roletami. Najmniej godzin w przedziale komfortu uzyskano w wariantcie 4, w którym opuszczanie rolet uzależniono od natężenia promieniowania.

Kierując się miarodajnym kryterium ważonej miary dyskomfortu, stwierdzono, że najmniej korzystny wariant dotyczy sytuacji, kiedy rolety wewnętrzne są odsłonięte w czasie użytkowania szkoły,

a długość łamaczy wynosi 0,4 m (wariant 3). Wynik otrzymany w przypadku tego wariantu jest o 20% wyższy, w porównaniu z identycznym pod względem wysięgu łamaczy wariantem pierwszym, ale z opuszczonymi roletami. Założone w wariantach 1 oraz 4 odmienne harmonogramy użytkowania rolet wewnętrznych przyniosły identyczne rezultaty miar dyskomfortu. Zarówno w przypadku ograniczenia temperatury w wariantcie 1, jak i sterowania zależnego do natężenia promieniowania w wariantcie 4 otrzymano 51 h ważonych miar dyskomfortu.

Zwiększenie wysięgu zewnętrznych łamaczy światła do 1,24 m w modelu drugim zredukowało liczbę ważonych godzin dyskomfortu o 8% w porównaniu z warunkiem pierwszym. Niewielka dysproporcja w liczbie ważonych godzin dyskomfortu wynika z przyjętego, identycznego w obu wariantach, schematu zasłaniania rolet wewnętrznych w godz. 7.00 – 15.00. Ponadto, ze względu na tor przemieszczania się słońca w ciągu dnia oraz jego wysokość w okresie letnim, łamacze na elewacji wschodniej w bardzo ograniczonym zakresie czasowym redukują dostęp promieniowania [13]. Na wielkość dysproporcji pomiędzy wariantami wpływa także rodzaj zastosowanego zespolonego, dwukomorowego zestawu szybowego o współczynniku przepuszczalności całkowitej energii słonecznej (SHGC)  $g = 0,63$ . Szyby potrójnie szklonego okna pasywnego pokryte są powłoką niskoemisyjną w celu ograniczenia strat ciepła przez promieniowanie. To rozwiązanie umożliwia pozyskanie zysków od promieniowania słonecznego i ograniczenie strat ciepła przez okna [14]. Współczynnik przepuszczalności ener-

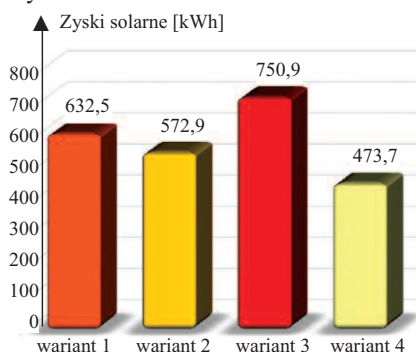
**Tabela 2. Godzinowy rozkład wskaźnika PMV w przypadku przyjętych wariantów symulacji**

*Table 2. Hourly distribution of the PMV index for the adopted simulation variant*

Warianty symulacji	komfortu cieplnego $-0,5 < PMV < +0,5$	Liczba godzin w przedziale			Ważona miara dyskomfortu związanego z przegrzewaniem [h]
		$+0,5 < PMV < +1,0$	$+1,0 < PMV < +1,5$	$+1,5 < PMV < +2,0$	
Wariant 1	110	15	15	2	51,0
Wariant 2	105	15	13	2	47,0
Wariant 3	105	18	17	4	64,0
Wariant 4	100	15	15	2	51,0



gii określa, jaki ułamek promieniowania słonecznego dociera do wnętrza budynku [15]. Rodzaj oszklenia, zastosowany w analizowanej szkole, z relatywnie dużą wartością tego współczynnika, jest niezbędny do pozyskania zysków solarnych zimą. W sezonie letnim może być natomiast znacznym utrudnieniem w ograniczeniu niepożądanego wówczas promieniowania słonecznego. Na rysunku 1 zestawiono obliczone zyski solarne w klasie w przypadku założonych czterech wariantów.



**Rys. 1. Zyski solarne w przypadku całego okresu dwumiesięcznego i czterech założonych wariantów**

*Fig. 1. Solar gains for the entire two-month period and the four assumed variant*

Największe wygenerowane w całym okresie dwumiesięcznym zyski solarne równe 750,9 kWh dotyczą sytuacji z odsłoniętymi roletami wewnętrznymi i są aż o 37% większe w porównaniu z najkorzystniejszą opcją czwartą. Najmniejsze zyski solarne 473,7 kWh dotyczą sytuacji, kiedy zasłanianie rolet uzależniono od wielkości promieniowania (wariant 4). Otrzymany wynik jest rezultatem zasłaniania rolet już od wczesnych godzin porannych w związku z osiągnięciem wymaganego poziomu natężenia 100 W/m<sup>2</sup>. W wariantcie pierwszym uzyskano wprawdzie większą sumę zysków solarnych niż w opcji czwartej, ale liczba ważonej miary dyskomfortu jest identyczne w obu przypadkach. Zaistniałe rozbieżności wynikają z tego, iż zyski solarne liczone są w przypadku pełnego okresu dwumiesięcznego, a pozostałe parametry dotyczą jedynie okresu użytkowego. Przy zwiększeniu długości łamaczy w modelu 2, suma zysków wynosi 572,9 kWh i jest o 9% mniejsza niż w wariantcie 1. Różnica zysków solarnych pomiędzy najmniej korzystnym przypadkiem z od-

słoniętymi przesłonami a wariantem wyjściowym to prawie 16%.

Ze względu na najmniejszą liczbę ważonych godzin dyskomfortu uzyskanych w wariantcie z łamaczami o długości 1,24 m, dalsze analizy obrotu bryły budynku dotyczyły takiej długości osłony. Godzinowy rozkład wskaźnika przewidywanej oceny średniej wraz z ważoną miarą dyskomfortu związanego z przegrzewaniem przedstawiono w tabeli 3. Najwięcej godzin w przedziale komfortu wyliczono w klasie wschodniej (105 h), a najmniej w północnej (85 h). Różnica pomiędzy tymi wariantami wynosi 19%. Klasa południowa i zachodnia mają prawie identyczną liczbę godzin w przedziale komfortu Fangera, odpowiednio 91 h i 90 h. Największe wartości dotyczą klasy wschodniej (47 h) i zachodniej (39 h), co wiąże się z największą liczbą godzin dyskomfortu. Najbardziej korzystnie wypada klasa północna (34 h) oraz klasa południowa (37 h). Zróznicowanie procentowe wśród otrzymanych miar dyskomfortu założonych przypadków wynosi 17 – 28%, przy czym górna wartość graniczna dotyczy dysproporcji pomiędzy klasą wschodnią i północną.

**Tabela 3. Godzinowy rozkład wskaźnika PMV w przyjętych wariantach symulacji**

*Table 3. Hourly distribution of the PMV index for the adopted simulation variant*

Warianty symulacji	Liczba godzin w przedziale komfortu cieplnego -0,5 < PMV < +0,5	Liczba godzin w przedziale			Ważona miara dyskomfortu związanego z przegrzewaniem [h]
		+0,5 < PMV < +1,0	+1,0 < PMV < +1,5	+1,5 < PMV < +2,0	
Klasa wschodnia	105	15	13	2	47,0
Klasa południowa	91	15	11	0	37,0
Klasa zachodnia	90	14	11	1	39,0
Klasa północna	85	14	10	0	34,0

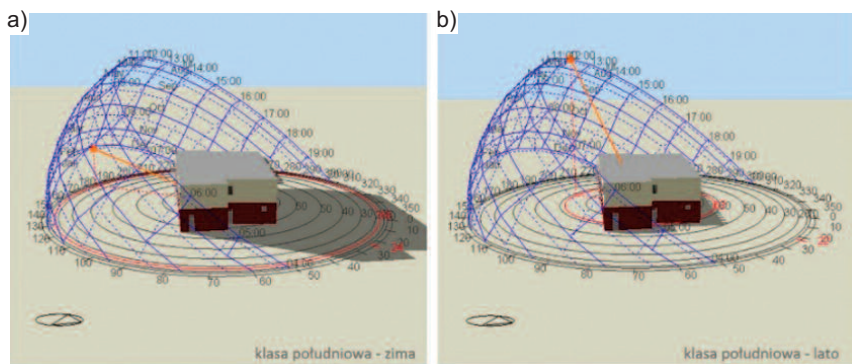
Najmniejszą wartość dyskomfortu uzyskano w przypadku usytuowania badanej klasy po stronie północnej. Dodatkowe analizy pokazały, że nie ma wówczas potrzeby używania rolet wewnętrznych, a miara dyskomfortu w przypadku ich odsłonięcia jest praktycznie identyczna jak w opcji z opuszczonymi przesłonami. Ponadto, stały dostęp oświetlenia naturalnego zapewnia wzmoczoną koncentrację oraz przyjemną atmosferę uczenia się, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów eksploatacji. Ze względu na mniejsze na elewacji północnej zyski energii słonecznej w trakcie zimy, w pasywnych budyn-

kach edukacyjnych na świecie stosuje się alternatywne rozwiązania, np. w pasywnej szkole Montessori w okolicach Monachium [16], zorientowanej zgodnie z założeniami budownictwa pasywnego wzdłuż osi wschód-zachód, przestronne sale lekcyjne zlokalizowano po stronie południowej, natomiast po stronie północnej pomieszczenia administracyjne, sanitarne i techniczne.

Niewielkie różnice pomiędzy analizowanymi wariantami budynku wynikają ze stosowania rolet w okresie jego użytkowania. O ile niewielkie wartości dyskomfortu w klasie północnej nie są zaskoczeniem, to na pierwszy rzut oka mógłby dziwić wynik w klasie południowej. Wyjaśnieniem jest rysunek 2, który obrazuje powszechnie znany pozorny ruch słońca po nieboskłonie i wnikanie promieniowania słonecznego do wnętrza klas w różnych porach roku. W miesiącu zimowym (np. grudzień) słońce porusza się nisko nad horyzontem. Zastosowane poziome osłony zewnętrzne nie są wówczas barierą dla zysków od promieniowania słonecznego. Latem (np. czerwiec), słońce świeci znacznie wyżej, więc łamcze powodują, że ilość promieniowania słonecznego

go docierającego do budynku zostaje znacznie ograniczona [17, 18, 19].

Na rysunku 3 zobrazowano rozkład zacielenia analizowanej klasy w zależności od zorientowania budynku. Wybrano jeden przykładowy dzień 11.06. z rozpatrywanego okresu dwumiesięcznego. Widać, że największe zacielenie o godz. 10.00 występuje w klasie północnej oraz zachodniej. W klasie południowej, mimo że o tej porze słońce świeci intensywnie na tę stronę elewacji, liczba godzin dyskomfortu jest mniejsza niż np. w klasie wschodniej, co wynika z wysokości słońca i skuteczności łamaczy w tym przypadku.



Rys. 2. Usytuowanie słońca w klasie południowej o godz. 12:00: a) w zimie; b) w lecie  
Fig. 2. Sun positioning for the southern class at 12:00 pm: a) in winter; b) in summer

Otrzymane wyniki potwierdzają słusność założeń projektowych budownictwa pasywnego z punktu widzenia ochrony przed przegrzewaniem. Zorientowanie budynku szkoły najdłuższą osią wzdłuż linii północ-południe jest mniej korzystne pod względem liczby godzin dyskomfortu, niż w przypadku usytuowania wschód-zachód. Po zmianie orientacji bryły o 90° uzyskano by o 17% mniej ważonych godzin dyskomfortu. Z uzyskanych informacji wynika, że usytuowanie szkoły w Budzowie jest konsekwencją niekorzystnego kształtu działki.

W celu sprawdzenia łącznej skuteczności wybranych rozwiązań porównano tzw. wariant referencyjny, w którym za-

stosowano chłodzenie z gruntu z wariantem zmodyfikowanym, uwzględniającym sugerowane w artykule zmiany. Nowy model, wyposażony w mechaniczną wentylację dzienną i nocną, uwzględnia obrót bryły budynku o 90° w kierunku południowym oraz wydłużenie zewnętrznych łamaczy światła do długości 1,24 m. W obu wariantach rolety zacinające usytuowane są po wewnętrznej stronie okna i zasłaniane w godzinach użytkowania 7.00 – 15.00, gdy temperatura wewnątrz osiągnie wartość 24°C.

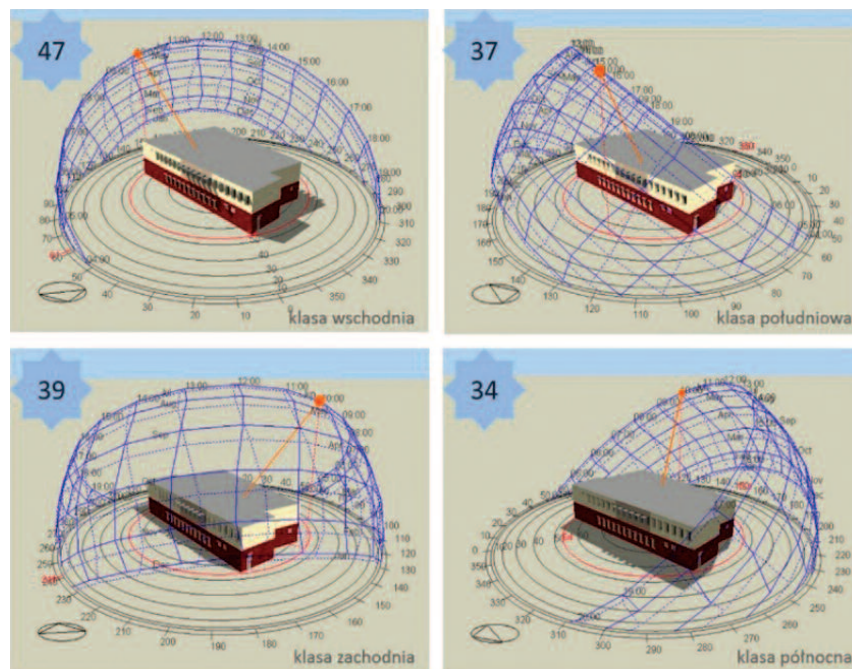
W tabeli 4 zestawiono obliczoną na podstawie symulacji liczbę godzin w przedziałach wskaźnika przewidywanej oceny średniej oraz miary dys-

komfortu związanego z przegrzewaniem. W zakresie najbliższym górnej granicy komfortu Fangera wariant referencyjny ma o 40% godzin mniej w porównaniu z modelem zmodyfikowanym. W obu porównywanych przypadkach nie występują wartości PMV większe niż 1,5. Liczba godzin w przedziale komfortu cieplnego jest w wariantcie referencyjnym o 45% większa niż w modelu zmodyfikowanym. Ważona miara dyskomfortu w nowym modelu jest prawie czterokrotnie większa niż w przypadku odzwierciedlającym faktyczny sposób użytkowania szkoły i wynosi 37 h.

## Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że system wentylacji mechanicznej skutecznie ogranicza dyskomfort latem jedynie w połączeniu ze źródłem chłodu w formie gruntowego wymiennika ciepła i pompy ciepła. Pozostałe sugerowane modyfikacje, mimo że zmniejszają liczbę ważonych miar dyskomfortu związanego z przegrzewaniem, w porównaniu z innymi wariantami, nie są tak efektywne jak chłodzenie gruntowe.

Duże wartości współczynnika przepuszczalności energii słonecznej w pasywnych szkleniach generują duże zyski solarne, z którymi osłony wewnętrzne nie są w stanie sobie dostatecznie poradzić w okresach użytkowych. Ponadto osłony ograniczają dostępność światła dziennego oraz uniemożliwiają kontakt wizualny ze środowiskiem zewnętrznym, dlatego muszą być odpowiednio dobrane i rozważnie stosowane. Stały dostęp oświetlenia naturalnego zapewnia bowiem dobrą koncentrację oraz przyjemną atmosferę uczenia się, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów eksploatacji. W przypadku szkół, odpowiednia intensywność oświetlenia ma kluczowe znaczenie w zapewnieniu optymalnych warunków do nauki. Z kolei zewnętrzne łamacze światła ograniczają dostęp promieni słonecznych do wnętrza, ale ich skuteczność w dużym stopniu zależy od pory roku, pory dnia, usytuowania bryły budynku względem stron świata oraz intensywności nasłonecznienia. Przyjęte w analizach trzykrotne zwiększenie wysięgu



Rys. 3. Rozkład zacienienia oraz obliczone ważne miary dyskomfortu związane z przegrzewaniem w przypadku różnej orientacji budynku 11.06. o godz. 10.00

Fig. 3. Distribution of shading and calculated weighted measures of overheating discomfort for different building orientations on the 11.06 at 10 am



**Tabela 4. Godzinowy rozkład wskaźnika PMV w przyjętych wariantach symulacji**  
*Table 4. Hourly distribution of the PMV index for the adopted simulation variant*

Warianty symulacji	Liczba godzin w przedziale				Ważona miara dyskomfortu związanego z przegrzewaniem [h]
	komfortu cieplnego - 0,5 < PMV < +0,5	+0,5 < PMV < +1,0	+1,0 < PMV < +1,5	+1,5 < PMV < +2,0	
Referencyjny	165	9	0	0	9,0
Zmodyfikowany	91	15	11	0	37,0

wspornika na elewacji wschodniej spowodowało zmniejszenie sumy zysków solarnych zaledwie o 9% oraz ważonej miary dyskomfortu o 8% w porównaniu z wariantem wyjściowym.

Zorientowanie bryły najdłuższą osią wzdłuż linii wschód-zachód jest najkorzystniejszym rozwiązaniem w kształtowaniu komfortu cieplnego. Zabezpieczone odpowiednimi osłonami zewnętrznymi i wewnętrznymi pomieszczenia usytuowane po stronie południowej generują mniej godzin dyskomfortu niż sale zlokalizowane po stronie wschodniej i zachodniej. Orientacja północna wiąże się z najmniejszą liczbą godzin dyskomfortu latem, ale też z ograniczonym dostępem bezpośredniego promieniowania słonecznego. Zgodnie z praktyką stosowaną w budownictwie pasywnym, sugeruje się umieszczanie po stronie północnej np. pomieszczeń sportowych, administracyjnych czy technicznych. Oceniając jednak w nieco inny sposób rozważane rozwiązania, należy zauważyć, że w wytycznych stworzonych przez Instytut Budownictwa Pasywnego w Darmstadt dotyczących projektowania budynków pasywnych [20], dopuszczalny jest okres przegrzewania wnętrza trwający nie dłużej niż 10% w ciągu roku. W tym kontekście proponowane modyfikacje budynku szkoły byłyby wystarczające do utrzymania akceptowalnych warunków eksploatacji we wnętrzu.

Warto wspomnieć, że coraz częściej do oceny warunków cieplnych w budynkach z wentylacją hybrydową stosuje się model komfortu adaptacyjnego. Zgodnie z nim, podczas długiego okresu zwiększającej się temperatury powietrza zewnętrznego ludzki organizm adaptuje się powoli do tych warunków,

a przedział warunków komfortowych przesuwa się w kierunku wyższej temperatury. Tego typu podejście może być stosowane tylko wtedy, gdy użytkownicy budynku mają możliwość dopasowania odzieży czy otwierania okien, stosownie do zmieniających się warunków otoczenia. Uwzględniająca adaptację użytkowników łagodniejsza ocena mikroklimatu pozwala, po spełnieniu stawianych wymagań, zaakceptować warunki traktowane wg kryterium Fanger'a jako przegrzewanie. 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 małego 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.

## Literatura

- [1] Mendell MJG, Heath GA. Do indoor pollutants and thermal conditions in school's influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*. 2005; 15: 27 – 52.
- [2] Mishra AK, Ramgopal M. A thermal comfort field study of naturally ventilated classrooms in Kharagpur, India, *Building and Environment*. 2015; Volume 92, 396 – 406.
- [3] Šenitková IJ. Indoor Air Quality and Thermal Comfort in School Buildings, *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMES 2017)*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 95(4), 2017.
- [4] Singh MK, Ooka R, Rijal HB. Thermal comfort in classrooms: a critical review, 10th Windsor Conference 2018: Rethinking

Comfort, 12th–15th April 2018, Cumberland Lodge, The Great Park, Windsor, Berkshire SL4 2HP. Published in Conference Proceedings pp 649 – 668, ISBN-978-0-9928957-8-5.

[5] Singh MK, Ooka R, Rijal HB, Mahapatra S, Kumar S, Kumar A. Progress in thermal comfort studies in classrooms over last 50 years and way forward. *Energy and Buildings*. 2019.

[6] Tagliabue LCh, Accardo D, Kontoleon KJ. Ciribini A.L.C., Indoor comfort conditions assessment in educational buildings with respect to adaptive comfort standards in European climate zones, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 410 (2020) 012094, SBE19 Thessaloniki

[7] Wargocki P, Wyon DP. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective, *Build. Environ*. 2013; 59: 581 – 589.

[8] 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. *Build. Environ*. 2013; 70: 171 – 188.

[9] Zomorodiana ZS, Tahsildoosta M, Hafezi M. Thermal comfort in educational buildings: A review article, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; Volume 59: 895 – 906.

[10] Projekt wykonawczy gminnej szkoły podstawowej w Budzowie – Architektura, arch. Bożeny Bończa-Tomaszewskiej z pracowni architektonicznej Bończa-Studio.

[11] Dequaire X. Passivhaus as a low-energy building standard: contribution to a typology, *Energy Efficiency*. 2012; 5: 377 – 391.

[12] PN-EN 1525 Kryteria środowiska wewnętrznego, obejmujące warunki cieplne, jakość powietrza wewnętrznego, oświetlenie i hałas.

[13] Sadłowska-Sałęga A. Materiały pomocnicze do ćwiczeń z przedmiotu; Ogrzewnictwo, wentylacja i klimatyzacja II, rozdział III; bilans cieplny budynku, Uniwersytet Rolniczy, Kraków.

[14] Santamours M. Passive Cooling of Buildings, *Advances of Solar Energy*, 2005, ISES, James and James Science Publishers, London.

[15] Idczak M, Firląg Sz. Okna w budynkach pasywnych – funkcje, wymagania, bilans energetyczny, komfort cieplny, Instytut Budynków Pasywnych przy Narodowej Agencji Poszanowania Energii S.A. Warszawa.

[16] Dąbrowska A. Budownictwo energooszczędne i pasywne. Katalog dobrych przykładów, Warszawa 2015.

[17] Firląg Sz, Schnieders J. Budynek pasywny w centralnej Polsce, <https://docplayer.pl/14372679-Budynek-pasywny-w-centralnej-polsce.html>.

[18] Kisilewicz T. Przegrzewanie budynków niskoenergetycznych. Napędy i sterowanie. 2013; str. 65 – 69.

[19] Zielonko-Jung K. Relacja przeszkleń do powierzchni pełnych w budynkach o obniżonym zapotrzebowaniu na energię, *Inżynier Budownictwa, Dodatek specjalny IB – Elewacje i docięplenia*. 2013; str. 64 – 68.

[20] Figielek A, Królczyk B. Budynki pasywne, WIDP Wielkopolski Dom Pasywny. 2015, Poznań.

Przyjęto do druku: 17.11.2023 r.