

dr inż. Iwona Pokorska-Silva<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-0895-6587

dr hab. inż. Artur Nowosiwiat, prof. PŚ.<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0002-0277-7388

# Analiza przypadków przegrzania mieszkań na ostatnich kondygnacjach budynków w technologii tradycyjnej

## *Analysis of overheating cases of apartments on the top floor in buildings in traditional technology*

DOI: 10.15199/33.2023.11.05

**Streszczenie.** Przegrzewanie pomieszczeń ostatniej kondygnacji sprawia, że komfort cieplny nie jest zachowany. W krajach takich jak Polska, gdzie nie używa się powszechnie klimatyzacji, problem ten jest szczególnie widoczny. W celu jego dokładnego zbadania wykonano w okresie letnim pomiary temperatury w pomieszczeniach budynków mieszkalnych wybudowanych w technologii tradycyjnej. Badania te potwierdziły problem przegrzewania tych pomieszczeń, dlatego też analizowano rozkład temperatury w miesiącach letnich w pomieszczeniach poddasza i niższych kondygnacji. Przeprowadzono również pomiar temperatury oraz symulacje numeryczne w budynku testowym. Ponadto wykazano wpływ wskaźnika utrzymania ciepła na średnią, maksymalną i minimalną temperaturę w pomieszczeniach. Za pomocą symulacji w ESP-r pokazano wpływ wskaźnika utrzymania ciepła na rozrzut wyników, gdyż okazuje się, że im większa jest jego wartość, tym rozrzut temperatury w ciągu doby jest mniejszy.

**Słowa kluczowe:** komfort cieplny; przegrzewanie mieszkań; rozkład temperatury; wskaźnik utrzymania ciepła.

**Abstract.** It is commonly known that thermal comfort in the rooms on top floors is interrelated with their overheating. In regions (such as Poland) where air conditioning is not widely used, this problem is particularly evident. In order to thoroughly examine it, temperature measurements were made in the summer period. The measurements were made in the living quarters of buildings constructed in a traditional technology. The tests carried out confirmed that the top-floor rooms were subject to overheating. Therefore, the analysis involved also temperature distribution during the summer months both for attic rooms and rooms on lower floors. Temperature measurement and numerical measurement were also carried out in the test building. Moreover, the impact of the heat retention rate on the average, maximum, and minimum room temperatures was determined. First of all, using the simulation in ESP-r, the impact of heat retention rate on the scatter of results was demonstrated, since it turns out that the higher the value of heat retention rate, the smaller the temperature spread during the day.

**Keywords:** thermal comfort; overheating of apartments; temperature distribution; heat retention index.

Ciągłe zaludnianie miast [1] powoduje wzrost temperatury powietrza, a w efekcie pogarsza warunki komfortu cieplnego. Badacze zajmują się analizą zewnętrznego komfortu cieplnego przy różnej zabudowie miast [2, 3]. Od klimatu miejscowego miasta czy osiedla, w którym budynek się znajduje, zależy w istotny sposób mikroklimat wewnątrz budynków. Temperatura powietrza otaczającego budynek wpływa na rozkład oraz przebieg temperatury i wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniach.

Komfort cieplny wewnątrz budynków wpływa na zdrowie fizyczne i psychiczne ludzi tam przebywających [4, 5]. W celu jego poprawy można stosować np. tkaniny do ochrony ciała [6];

klimatyzację i ogrzewanie [7] oraz odpowiednio kształtować przegrody budowlane, co wpływa na ich akumulacyjność [8]. Wiadomo, że właściwości termiczne przegród zewnętrznych mają wpływ na obciążenie cieplne budynku, ponieważ ciepło przenoszone jest przez przegrodę [9, 10]. Przewodność i akumulacyjność cieplna są najważniejszymi parametrami wpływającymi na przenoszenie ciepła przez przegrody budowlane [11, 12]. Wykorzystując informację o tych parametrach, można kształtować ograniczenie strat ciepła przez zastosowanie izolacji cieplnej np. typu ETICS [13] lub materiałów zmiennofazowych [14]. W najnowszych badaniach [15] wykazano, że materiały zmiennofazowe powodują znaczną poprawę energooszczędności budynków. Ponadto wiele badań obejmuje symulacje dotyczące transportu ciepła przez przegrody

budowlane [16, 17] oraz mostków termicznych [18].

W analizie komfortu cieplnego najczęściej stosowanym wskaźnikiem jest PMV (*Predicted Mean Vote*) opracowany przez Fangera [19]. PMV bazuje na analizie bilansu cieplnego organizmu człowieka z uwzględnieniem fizycznych czynników środowiska, takich jak temperatura powietrza, poziom izolacji odzieży, tempo przemiany materii i wilgotności względnej [20, 21]. Na temat komfortu cieplnego można znaleźć wiele opracowań [22]. W gorącym klimacie w celu poprawy komfortu cieplnego używa się sprasowanych bloczków ziemnych [23]. Mascaraque i inni [24] opisali wpływ bezwładności cieplnej na komfort cieplny w budynku. Natomiast w tym artykule przedstawiono problematykę przegrzewania budynków w Polsce. Badania dotyczą przede wszystkim ostat-

<sup>1)</sup> Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

<sup>\*</sup> Adres do korespondencji:  
artur.nowosiwiat@polsl.pl

nich kondygnacji budynków. W tym celu opisano problem na przykładzie istniejących budynków, a następnie badania i analizy numeryczne przeprowadzono w warunkach półrzeczywistych.

## Metody badań

Wykonano następujące badania:

- pomiar temperatury powietrza w wybranych pomieszczeniach ostatnich i przedostatnich kondygnacji budynku jednorodzinny oraz wielorodzinnego;

- pomiar temperatury powietrza w obiekcie testowym o skali półrzeczywistej (obiekt o przegrodach wykonanych w technologii lekkiego szkieletu drewnianego znajdujący się na stanowisku badawczym laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej);

- analizy symulacyjne służące ocenie skuteczności stosowanych sposobów ochrony (układów ścian) przed nadmiernym przegrzewaniem się pomieszczeń przeprowadzone w przypadku obiektu testowego o skali półrzeczywistej.

**Charakterystyka obiektów.** **Obiekt A**, to budynek wielorodzinny w zwartej zabudowie miejskiej wzniesiony w technologii tradycyjnej murowanej, z dachem o konstrukcji drewnianej pokrytym dachówką ceramiczną. Dach oraz strop pod poddaszem nie są izolowane termicznie. Budynek został wyposażony w wentylację grawitacyjną. Ściana południowo-zachodnia po termomodernizacji.

**Obiekt B** – budynek jednorodzinny wolnostojący wzniesiony w technologii tradycyjnej murowanej z dachem o konstrukcji drewnianej pokrytym dachówką ceramiczną. Budynek ma wentylację grawitacyjną. W 2019 r. izolację termiczną miał tylko dach nad częścią południowo-zachodnią, a w 2021 r. wszystkie ściany i dach były już po termomodernizacji.

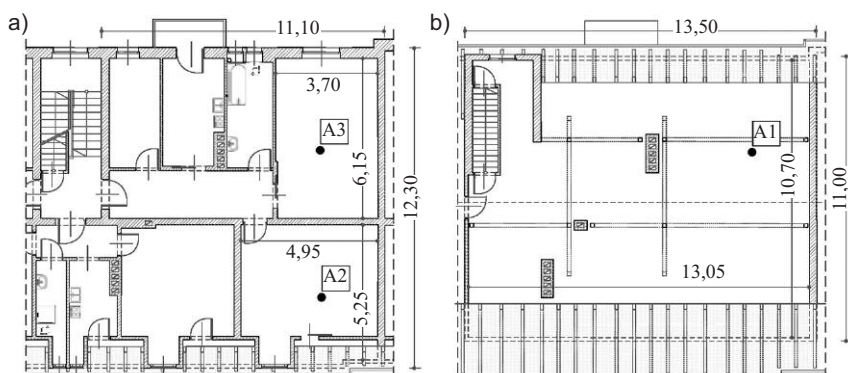
**Obiekt C** to obiekt w skali tzw. półrzeczywistej – znajduje się na stanowisku badawczym laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Ma wymiary zewnętrzne 6,0 x 4,15 x 5,2 m i wykonany jest w technologii lekkiego szkieletu drewnianego. Wszystkie przegrody zewnętrzne i wewnętrzne cechują się bardzo dobrą izolacyjnością termiczną ( $U$  ścian zewnętrznych wynosi  $0,09 \div 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Obiekt nie ma otworów okiennych i cha-

rakteryzuje się bardzo dobrym stopniem szczelności. Podczas badań drzwi wewnętrzne były otwarte.

Pomiary w obiekcie A wykonano w dwóch pokojach mieszkania znajdującego się na przedostatniej kondygnacji (czwarte piętro) oraz na poddaszu nieużytkowym (rysunek 1), a w obiekcie B w dwóch pokojach mieszkania przedostatniej kondygnacji (pierwsze

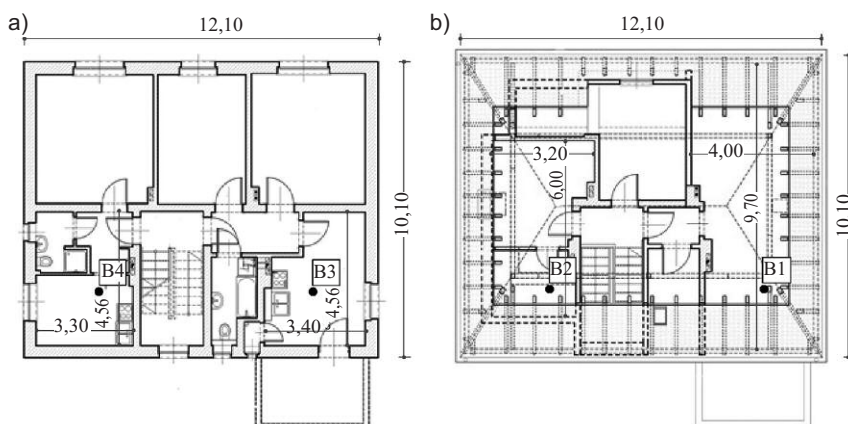
piętro) oraz w dwóch pokojach poddasza. Rozmieszczenie punktów pomiarowych przedstawiono na rysunku 2. Pomiary obiektu C przeprowadzono w całym obiekcie (rysunek 3).

**Modelowanie numeryczne.** Analizy numeryczne przeprowadzono w programie *Environmental Systems Performance ESP-r*, który służy do analizy dynamicznego zachowania zarówno całego budy-



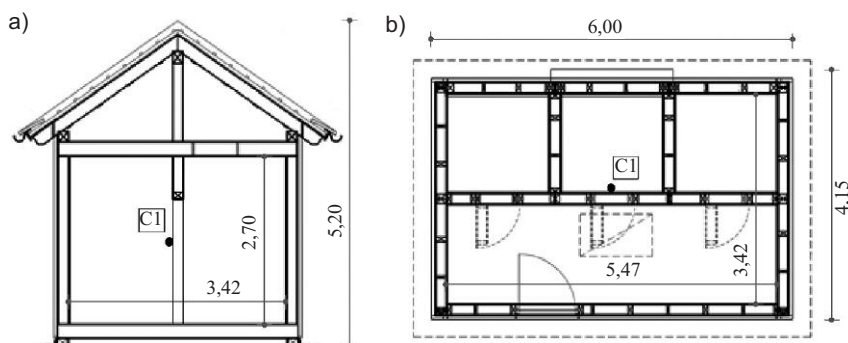
Rys. 1. Schemat rozmieszczenia czujników temperatury w obiekcie A [25]: a) rzut 4. piętra; b) rzut poddasza

Fig. 1. Diagram of the arrangement of temperature sensors object A [25]: a) plan of the 4th floor; b) plan of the attic



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia czujników temperatury w obiekcie B: a) rzut 1. piętra; b) rzut poddasza

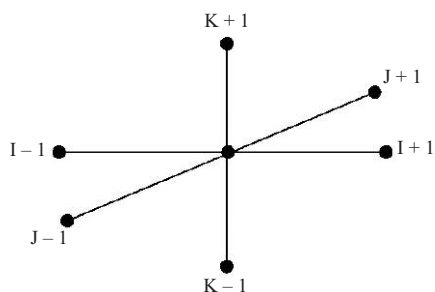
Fig. 2. Diagram of the arrangement of temperature sensors object B: a) plan of the 1st floor; b) plan of the attic



Rys. 3. Schemat usytuowania czujnika temperatury w obiekcie C: a) przekrój; b) rzut

Fig. 3. Diagram of the location of temperature sensor in object C: a) cross section; b) plan

ku, jak i jego elementów. Umożliwia modelowanie przepływu masy i energii, dając wyniki bardzo dobrze odwzorowujące rzeczywiste środowisko budynku. W programie tym dyskretyzacja przestrzeni dokonywana jest metodą objętości skończonych [12]. Każda objętość składa się z węzła w środku (rysunek 4).



**Rys. 4. Schemat powiązania środkowego węzła objętości skończonej z pozostałymi węzłami**

*Fig. 4. Diagram of the connection of the middle node of the finite volume with other nodes*

Węzły powiązane są ze sobą za pomocą równania macierzowego [26]:

$$A\theta_{n+1} = B\theta_n + C \quad (1)$$

gdzie:

A – macierz opisująca kolejne kroki czasowe;

B – bieżący krok czasu;

C – znane warunki brzegowe.

Analizy numeryczne dotyczyły modelu odpowiadającego geometrii i warunkami rzeczywistemu obiektowi testowemu o skali półrzeczywistej (obiektu C). Obiekt potraktowano jako jedną strefę. W modelu nie wprowadzono zysku ciepła od użytkowników. Stopień szczelności przegród budynku przyjęto jako bardzo dobry i nie wprowadzono systemu wentylacji. Jako warunki brzegowe wykorzystano dane typowego roku meteorologicznego w Katowicach (19°01'E, 50°16'N).

Analizie poddano odpowiedzi termiczne trzech wariantów przegród.

1) różne układy warstw muru z cegły pełnej o grubości 25 cm z warstwą izolacyjną ze styropianu grubości 15 cm oraz z tynkiem obustronnym grubości 1 cm;

2) cztery różne ściany konstrukcyjne: z cegły ceramicznej pełnej grubości 25 cm; z bloczków z betonu komórkowego grubości 24 cm; z pustaków żużłobetonowych grubości 24 cm oraz żelbetowa grubości 15 cm. W każdym przypadku była izolacja cieplna ze styropianu oraz tynk obustronny;

3) mur z pustaków żużłobetonowych z trzema różnymi materiałami termoizo-

lacyjnymi: styropian o współczynniku przewodzenia ciepła  $\lambda = 0,040$  W/mK; wełna mineralna  $\lambda = 0,037$  W/mK oraz tynk obustronny.

We wskazanych wariantach grubości izolacji przyjmowano w taki sposób, aby współczynnik przenikania ciepła  $U = 0,2$  W/m<sup>2</sup>K. Właściwości materiałów użytych do budowy ścian dobrano zgodnie z normami ISO 6946 [27] i EN 12524 [28] oraz bazą materiałową z programu ESP-r. W przypadku każdego układu ściany wielowarstwowej wyznaczono wskaźnik utrzymania ciepła ze wzoru:

$$z = \sum_i R_i C_i \quad (2)$$

gdzie:

$R_i$  – opór cieplny od środka warstwy i do powietrza zewnętrznego;

$C_i$  – pojemność cieplna i-tej warstwy ściany.

W efekcie rozpatrywano sześć układów ściennych V1 – V6:

• V1: tynk wapienny – mur z cegły ceramicznej pełnej – styropian EPS040 – tynk wapienny na siatce z włókna szklanego, grubość ściany  $d_w = 44,9$  cm, wskaźnik utrzymania ciepła  $z_w = 533,075$  h;

• V2: tynk wapienny – styropian EPS040 – mur z cegły ceramicznej pełnej – tynk wapienny na siatce z włókna szklanego, grubość ściany  $d_w = 44,9$  cm, wskaźnik utrzymania ciepła  $z_w = 40,927$  h.

• V3: tynk wapienny – mur z bloczków z betonu komórkowego – styropian EPS040 – tynk wapienny na siatce z włókna szklanego, grubość ściany  $d_w = 39,2$  cm, wskaźnik utrzymania ciepła  $z_w = 156,882$  h;

• V4: tynk wapienny – żelbet – styropian EPS040 – tynk wapienny na siatce z włókna szklanego, grubość ściany  $d_w = 35,9$  cm, wskaźnik utrzymania ciepła  $z_w = 438,940$  h.

• V5: tynk wapienny – mur z pustaków żużłobetonowych – styropian EPS040 – tynk wapienny na siatce z włókna szklanego, grubość ściany  $d_w = 43,6$  cm, wskaźnik utrzymania ciepła  $z_w = 207,781$  h.

• V6: tynk wapienny – mur z pustaków żużłobetonowych – wełna mineralna 037 – tynk wapienny na siatce z włókna szklanego, grubość ściany  $d_w = 42,2$  cm, wskaźnik utrzymania ciepła  $z_w = 215,898$  h.

## Wyniki badań i ich omówienie

Badania w obiektach A, B, C zostały przeprowadzone w różnych pomieszczeniach, a w przypadkach, gdy prze-

prowadzono termomodernizację budynku, wykonano je przed i po termomodernizacji. Miejsca badań oznaczono:

■ A1 – obiekt A – ostatnia kondygnacja – poddasze – część niemieszkalna;

■ A2 – obiekt A – przedostatnia kondygnacja (4 piętro) – część przeznaczona do zamieszkania (niezamieszkała w okresie letnim) – NE (strona świata);

■ A3 – obiekt A – przedostatnia kondygnacja (4 piętro) – część przeznaczona do zamieszkania (niezamieszkała w okresie letnim) – SW (strona świata);

■ B1 – obiekt B – ostatnia kondygnacja – poddasze – część niemieszkalna – NE (strona świata);

■ B2 – obiekt B – ostatnia kondygnacja – poddasze – część przeznaczona do zamieszkania (niezamieszkała) – SE (strona świata) – przed termomodernizacją;

■ B2.1 – obiekt B – ostatnia kondygnacja – poddasze – część przeznaczona do zamieszkania (niezamieszkała) – SE (strona świata) – po termomodernizacji;

■ B3 – obiekt B – przedostatnia kondygnacja (1 piętro) – część przeznaczona do zamieszkania (niezamieszkała) – NE (strona świata),

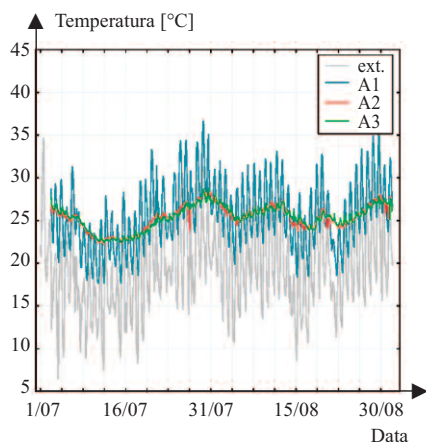
■ B4 – obiekt B – przedostatnia kondygnacja (1 piętro) – część przeznaczona do zamieszkania (niezamieszkała) – SE (strona świata) – przed termomodernizacją,

■ B4.1 – obiekt B – przedostatnia kondygnacja (1 piętro) – część przeznaczona do zamieszkania (niezamieszkała) – SE (strona świata) – po termomodernizacji,

■ C1 – obiekt C – pomieszczenie obiektu testowego.

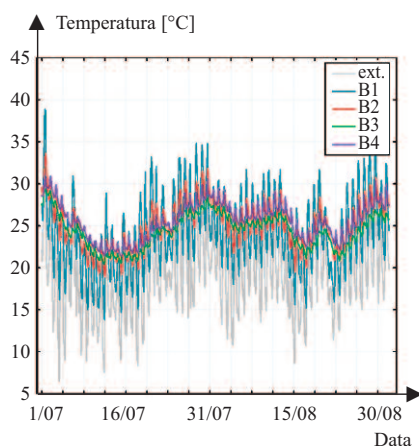
Wyniki rozkładu temperatury w obiekcie A przedstawiono na rysunku 5, z którego wynika, że duże wahania temperatury występują na poddaszu nieużytkowym. Wynikają one przede wszystkim z nagrzewania się dachu w ciągu dnia i studzenia w ciągu nocy (nie ma bezpośredniego działania promieniowania słonecznego), co wpływa na wysoką temperaturę w pomieszczeniu bezpośrednio pod nim. W pomieszczeniach mieszkalnych te wahania są mniejsze. Wynika to przede wszystkim z faktu, że A2 i A3 nie znajdują się bezpośrednio pod nieocieplonym i nagrzewającym się dachem.

Wyniki rozkładu temperatury w obiekcie B przedstawiono na rysunku 6. W tym przypadku najwyższa temperatu-



**Rys. 5. Rozkład temperatury w obiekcie A w wariantach A1, A2, A3**

Fig. 5. Temperature distribution for object A in variants A1, A2, A3



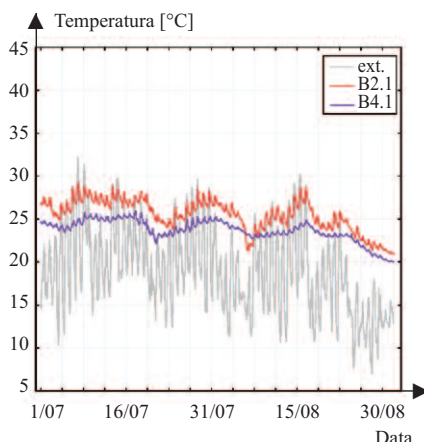
**Rys. 6. Rozkład temperatury w obiekcie B w wariantach B1, B2, B3, B4**

Fig. 6. Temperature distribution for object B in variants B1, B2, B3, B4

ra oraz największe jej wahania w ciągu dnia występują również na poddaszu. Poza tym najniższa temperatura osiągnięta jest w pomieszczeniu od strony NE. Na rysunku 7 pokazano rozkład temperatury w obiekcie B po termomodernizacji, w którym również można obserwować znacznie wyższą temperaturę na poddaszu niż w pomieszczeniu niższej kondygnacji.

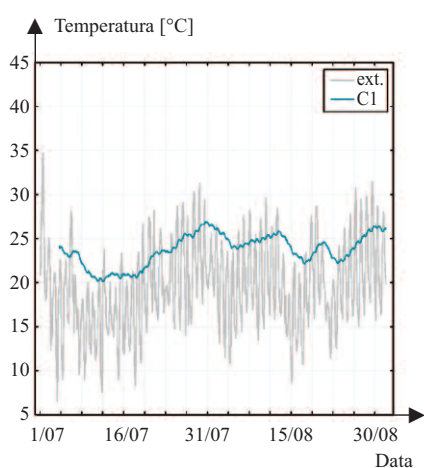
Rozkład temperatury w obiekcie C przedstawiono na rysunku 8. Jest on bardzo podobny, jak w obiekcie B w wariantach B4.1, co sugeruje, że docieplenie przegród budynku ma największy wpływ na komfort przebywania w nim ludzi.

W tabeli 1 zestawiono wartości średnie, minimalne i maksymalne temperatury powietrza w lipcu i sierpniu, a także odchylenie standardowe. Uzupełnio-



**Rys. 7. Rozkład temperatury w obiekcie B w wariantach B2.1, B4.1**

Fig. 7. Temperature distribution for object B in variants B2.1, B4.1



**Rys. 8. Rozkład temperatury w obiekcie C**

Fig. 8. Temperature distribution for object C

no je współczynnikami korelacji temperatury zewnętrznej i wewnętrznej. W tabeli 2 podano dniowe amplitudy temperatury oraz liczbę dni i godzin o temperaturze poza komfortem cieplnym.

**Tabela 1. Wyniki pomiarów temperatury powietrza**

Table 1. Results of temperature measurements of air

Wariant	Temperatura w lipcu [°C]			Temperatura w sierpniu [°C]			Współczynnik korelacji r	Odchylenie standardowe
	maks.	śr.	min.	maks.	śr.	min.		
A1	36,6	25,2	17,7	35,6	26,7	18,4	0,82	3,8
A2	28,7	24,9	22,2	28,0	26,1	23,8	0,49	1,5
A3	28,8	24,9	22,5	27,8	26,1	23,9	0,44	1,4
B1	38,9	23,8	13,8	34,5	25,5	15,2	0,91	4,4
B2	33,6	24,9	18,9	30,7	25,0	19,5	0,64	2,8
B2.1	29,3	26,6	23,8	28,7	25,4	20,9	0,66	1,9
B3	29,3	24,2	20,4	27,3	25,3	20,8	0,49	2,1
B4	31,0	25,3	21,4	30,4	26,4	22,2	0,55	2,2
B4.1	26,0	24,4	22,2	25,1	23,0	20,0	0,57	1,3
C1	26,9	22,9	20,1	26,4	24,4	22,1	0,40	1,8
Warunki zewnętrzne 2019*	34,7	19,0	6,5	31,5	20,1	8,6		4,8
Warunki zewnętrzne 2021*	32,3	21,0	10,3	30,3	17,0	7,0		4,8

\* Na podstawie <https://meteomodel.pl/dane/histeryczne-dane-pomiarowe/>

Środowisko atmosferyczne oddziałuje nieprzerwanie, z różnym natężeniem na człowieka (bezpośrednio bądź pośrednio przez przegrody budynku). Poddano więc analizie warunki biotermiczne na zewnątrz budynku. Oceniono średnią dobową temperaturę powietrza ( $t_{e,av}$ ) w okresie lipiec – sierpień 2019 i 2021 r. wg następującej skali, przypisując odczucia cieplne:  $\leq 10,0$  zimno (0 i 0 dni); 10,1 – 15,0 chłodno (2 i 10 dni); 15,1 – 20,0 ciepło (28 i 27 dni); 20,1 – 25,0 bardzo ciepło (31 i 25 dni) i 25,1 – 30,0 gorąco (1 i 0 dni). Wyznaczono zmienność temperatury w przedziale dnia oraz określono liczbę dni w okresie lipiec – sierpień 2019 i 2021 r., w których występowały różnice temperatury  $dt_e$  ( $dt_e = t_{e,max} - t_{e,min}$ ) przypisane odpowiedniemu natężeniu bodźców termicznych [29, 30]:  $< 4,0^\circ\text{C}$  obojętne (0 i 3 dni);  $4,0 - 7,9^\circ\text{C}$  słabo odczuwalne (9 i 15 dni);  $8,0 - 11,9^\circ\text{C}$  silnie odczuwalne (21 i 24 dni);  $\geq 12,0^\circ\text{C}$  ostre (32 i 20 dni). Najwięcej było dni, w których odczucie bodźców określono jako silne i ostre. Średnia amplituda temperatury zewnętrznej wynosiła ok.  $11^\circ\text{C}$ , ale dochodziła nawet do ok.  $17^\circ\text{C}$ .

Szczególnie uciążliwe dla człowieka są warunki termiczne odznaczające się bardzo wysoką temperaturą powietrza. Oceniając warunki termiczne wybranego obszaru i czasu, wyznaczono liczbę dni, w których maksymalna temperatura zewnętrzna była  $25,0^\circ\text{C} < t_{e,max} \leq 30,0^\circ\text{C}$  (29 i 24 dni), przyjmowane jako dni gorące oraz liczbę dni, w których temperatura maksymalna była  $t_{e,max} > 30,0^\circ\text{C}$  (5 i 3 dni) – uznane za dni upalne (takich dni było niewiele).

**Tabela 2. Wyniki pomiarów temperatury wewnętrznej**  
 Table 2. Results of internal temperature measurements

Wariant	Liczba godzin o temperaturze $T_i \notin < T_{i,max}; T_{i,min} >^{**}$	Liczba dni o średniej temperaturze	Amplituda dniowa temperatury w lipcu [°C]			Amplituda dniowa temperatury w sierpniu [°C]		
			maks.	śr.	min.	maks.	śr.	min.
A1	589	14	11,1	7,7	2,7	10,3	8,1	3,9
A2	0	0	3,3	0,8	0,2	2,6	1,1	0,5
A3	0	0	1,7	0,8	0,3	2,3	1,0	0,5
B1	785	16	15,1	10,0	3,7	12,9	9,6	4,6
B2	313	6	5,6	3,5	1,5	5,5	3,8	1,5
B2.1	20	0	2,9	1,6	0,5	2,7	1,4	0,4
B3	119	3	1,7	1,2	0,7	1,9	1,3	0,6
B4	72	2	2,7	1,8	0,8	2,4	2,3	1,0
B4.1	17	0	1,7	0,9	0,4	0,8	0,5	0,1
C1	238	10	1,3	0,6	0,1	1,1	0,6	0,2
Warunki zewnętrzne 2019			16,3	11,5	4,1	14,8	11,7	6,2
Warunki zewnętrzne 2021			16,7	11,1	5,4	16,4	9,3	2,1

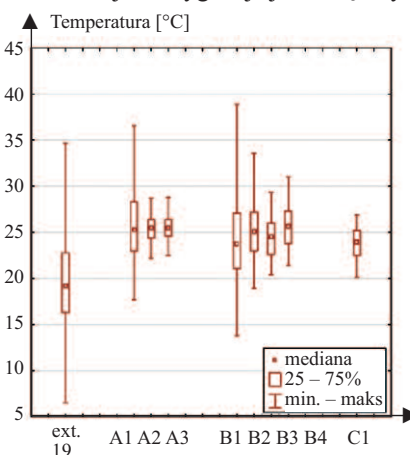
\*\* Granice wartości temperatury wewnętrznej na podstawie EN 15251 [31]: górna granica:  $T_{i,max} = 0,33 T_{m} + 18,8 + 3$ ; dolna granica:  $T_{i,min} = 0,33 T_{m} + 18,8 - 3$ ; gdzie:  $T_{m}$  – średnia bieżąca temperatura zewnętrzna [°C]

W okresie letnim na dobowe zmiany temperatury powietrza  $d_t$  w pomieszczeniach wpływają głównie wahania temperatury powietrza na zewnątrz budynku oraz bezpośrednie działanie słońca. Dobowe różnice temperatury powietrza w badanych pomieszczeniach wynoszą kilka, a nawet kilkanaście stopni (pomieszczenia w obiekcie A: 0,2–11,1°C; B: 0,1–15,1°C; C: 0,1–1,3°C). Największe amplitudy osiągnięto w pomieszczeniach B1 i A1, natomiast najmniejsze w pomieszczeniach A2, A3, B3, B4, a przede wszystkim w C1. Pomieszczenia, w których dzienna zmiana temperatury była największa, nie zapewniały komfortu użytkownikom. Temperatura w nich często znacznie się zmniejszała i zwiększała ponad odczucie komfortu cieplnego.

Temperaturę w pomieszczeniach porównano z obliczeniową wewnętrzną temperaturą operatywną [30] i wyznaczono dni, a później liczbę godzin o temperaturze przekraczającej wartość temperatury wewnętrznej (tabela 2). Najczęściej temperaturę przekraczającą oczekiwane wartości osiągnęto w pomieszczeniach poddasza B1 (785 h), A1 (589 h), B2 (313 h). W obiekcie C1 przez 238 h rejestrowano temperaturę poza komfortem cieplnym. Osiągnięto niską temperaturę, co było związane z brakiem okien i tym samym brakiem zysków ciepła od nasłonecznienia. Najlepsze warunki pod kątem użytkowania obiektu panowały w pomieszczeniach A2, A3 oraz B2.1 i B4.1.

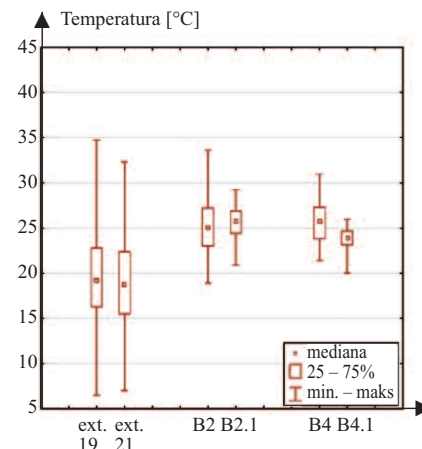
Z tabeli 1 wynika, że na poddaszu docieplonym (B2.1) jest wyższa temperatura średnia w ciągu całego miesiąca, ale niższa temperatura maksymalna. Może to sugerować, że dzięki izolacji cieplnej pomieszczenie nie przegrzewa się ekstremalnie, ale utrzymuje stałą stabilną temperaturę, która nie obniża się zbyt szybko nocą. Inaczej jest na niższej kondygnacji w wariantcie B4.1. Izolacja cieplna chroni przed skrajnie maksymalną temperaturą i utrzymuje ją na w miarę stałym poziomie (nie obniża się zbyt szybko nocą).

W celu lepszego zobrazowania i pełniejszej analizy przedstawiono wyniki za pomocą wykresów ramkowych na rysunkach 9 i 10. Można stwierdzić, że na ostatniej kondygnacji jest większy



**Rys. 9. Wykres ramkowy temperatury powietrza w badanych pomieszczeniach w 2019 r.**

Fig. 9. Box plot of air temperatures in the tested rooms in 2019 year



**Rys. 10. Wykres ramkowy temperatury powietrza w badanych pomieszczeniach obiektu B w 2019 i 2021 r., gdzie ext oznacza temperaturę zewnętrzną**

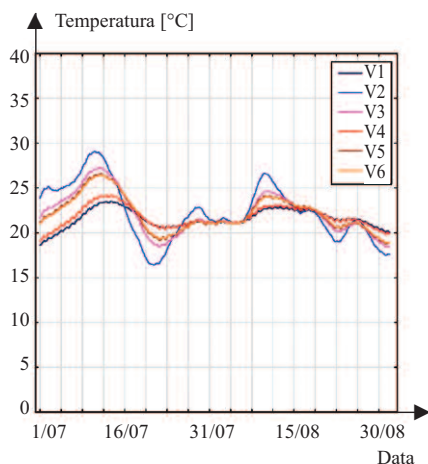
Fig. 10. Box plot of air temperatures in the tested rooms of object B in 2019 and 2021, where ext stands for external temperature

rozrzut temperatury w porównaniu z niższymi kondygnacjami, ale średnia temperatura jest zbliżona. Wynikać to może z faktu, że w ciągu dnia dach się mocno nagrzewa, a w ciągu nocy szybko ochładza, natomiast akumulacyjność cieplna ścian wpływa na mniejszy rozrzut wyników. Ponadto zastosowanie izolacji cieplnej dachu spowodowało mniejszy rozrzut wyników, ale średnia temperatura jest zbliżona do pomieszczenia z dachem nieizolowanym. Inaczej wygląda to w przypadku niższych kondygnacji, gdzie izolacja cieplna obniża średnią temperaturę w pomieszczeniu oraz maksymalną i minimalną temperaturę w ciągu doby.

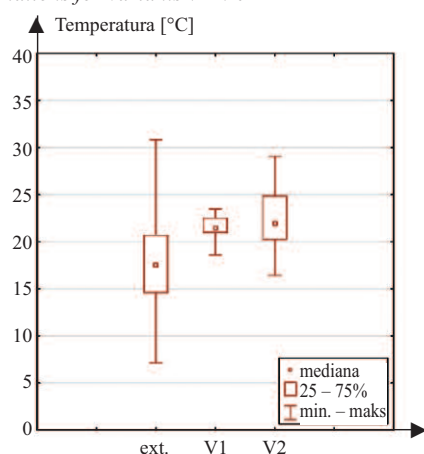
## Analiza numeryczna wariantów V1 – V6

Z rysunku 11 wynika, że największe wahania temperatury są w przypadku docieplenia od wewnątrz V2. Wynika to z bardzo małej wartości wskaźnika utrzymania ciepła. Można zatem wnioskować, że oprócz usytuowania pomieszczenia na najwyższym piętrze (pomieszczenia poddasza), zasadniczy wpływ na jego stabilność temperaturową ma wskaźnik utrzymania ciepła.

Analizując wyniki przedstawione na rysunku 12, stwierdzono, że zmiana układu warstw (docieplenie od wewnątrz) powoduje większy rozrzut wyników spowodowany nagrzewaniem się w dzień i szybkim studzeniem w nocy

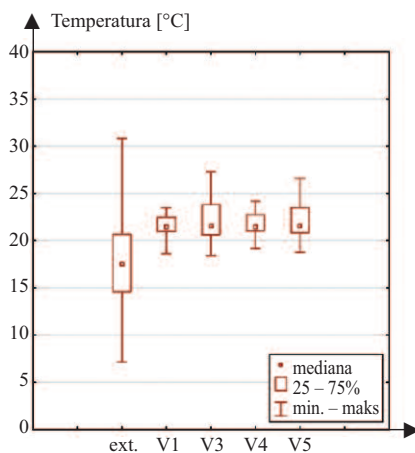


**Rys. 11. Rozkład temperatury w symulacjach dla wariantów V1-V6**  
 Fig. 11. Temperature distribution in simulations for variants V1-V6

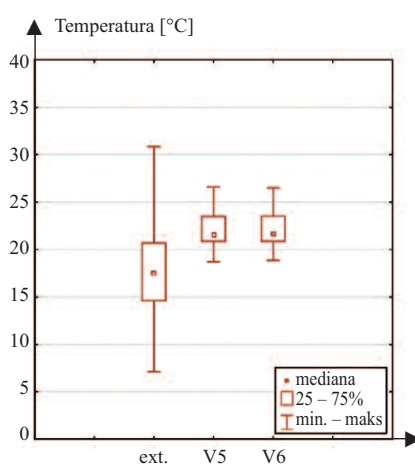


**Rys. 12. Wykres ramkowy temperatury powietrza w pomieszczeniach w sytuacji odwróconych warstw ściany w wariantach V1, V2**  
 Fig. 12. Box plot of air temperature in rooms in the case of inverted layers of the wall in variants V1, V2

w porównaniu z dociepleniem od zewnątrz. Natomiast średnia temperatura jest na podobnym poziomie, co można uznać za wynik nieoczywisty. Podobne analizy przeprowadzono w przypadku pomieszczeń ze zmieniającą się ścianą konstrukcyjną (rysunek 13) i stwierdzono, że średnia temperatura w tych pomieszczeniach jest na podobnym poziomie, ale ściana konstrukcyjna ma wpływ na rozrzut wyników dobowych, a w efekcie miesięcznych, co wynika z wskaźnika utrzymania ciepła  $\zeta$ . W przypadku V1, wartość  $\zeta$  jest największa, a rozrzut temperatury najmniejszy. Podobnie w przypadku wariantu V4, wartość  $\zeta$  jest większa niż wariantów V3 i V5, dlatego rozrzut temperatury jest w tym wariantcie niższy. Na rysunku 14



**Rys. 13. Wykres ramkowy temperatury powietrza w pomieszczeniach w sytuacji zmiany ściany konstrukcyjnej V1, V3-V5**  
 Fig. 13. Box plot of air temperature in rooms in the event of changes of the structural wall in V1, V3-V5



**Rys. 14. Wykres ramkowy temperatury powietrza w pomieszczeniach przy różnej izolacji cieplnej ściany V5, V6**  
 Fig. 14. Box plot of air temperature in rooms with different thermal insulation of the wall in V5, V6

widać, że izolacja nie wpływa na średnie wartości temperatury ani na rozrzut temperatury w pomieszczeniu. Dzieje się tak dlatego, że wskaźniki utrzymania ciepła są prawie takie same. Temperaturę w uzyskaną w analizowanych modelach (V1 – V6) porównano z wartością obliczeniową wewnętrznej temperatury operatywnej i wyznaczono liczbę godzin o temperaturze przekraczającej granice wartości temperatury wewnętrznej (tabela 3).

Dobra izolacyjność przegród i taka sama wartość współczynnika przenikania ciepła w przypadku każdego wariantu V1 – V6 przyczyniły się do uzyskania wyników zbliżonych. Największa różnica jest między wariantami V1 i V2.

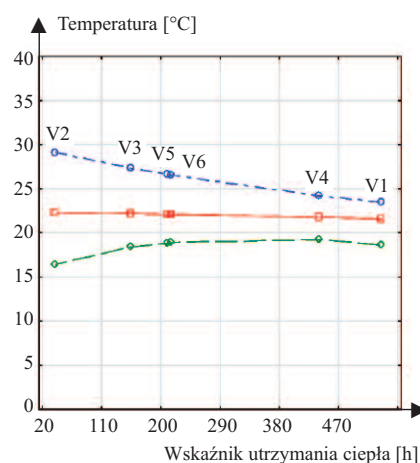
**Tabela 3. Wyniki analizy numerycznej**  
 Table 3. Results of simulation

Wariant	Liczba godzin o temperaturze $T_i \notin < T_{i,max}; T_{i,min} >^{**}$
V1	802
V2	685
V3	739
V4	732
V5	751
V6	741

\*\* Na podstawie EN 15251 [30]

Godziny poza komfortem cieplnym wynikają przede wszystkim z obniżenia temperatury w obiekcie, w związku z brakiem okien w analizowanym modelu i tym samym – brakiem zysków ciepła od nasłonecznienia. Pozwoliło to na dokładniejsze przyjrzenie się przegrodzie pełnej budynku.

Na rysunku 15 przedstawiono wpływ wskaźnika utrzymania ciepła na stabilność temperaturową w pomieszczeniach w wariantach V1 – V6. Wynika z niego, że wpływ wskaźnika utrzymania ciepła na średnią temperaturę w pomieszczeniu jest niewielki, natomiast wpływa on na zmianę temperatury maksymalnej i minimalnej, a przede wszystkim na rozrzut wyników.



**Rys. 15. Wykres zależności temperatury maksymalnej, średniej i minimalnej od wskaźnika utrzymania ciepła. Oznaczenia: linia niebieska przerywana kropką – temperatura maksymalna; linia czerwona ciągła – temperatura średnia; linia zielona przerywana kreską – temperatura minimalna**

Fig. 15. Graph of the dependence of maximum, average and minimum temperature on heat retention index. Maximum temperatures – blue dash-dotted line, mean temperatures – continuous red line, minimum temperatures – green dashed line

## Podsumowanie i wnioski

Badania miały na celu pokazanie wpływu rozkładu temperatury w pomieszczeniach w przedziale dobowym, a nawet dwumiesięcznym na komfort cieplny. Podobny problem zauważyli Al-Yasiri i Szabó [32], którzy przytoczyli zależność komfortu cieplnego od temperatury wyrażonej tzw. temperaturą operatywną. W artykule przedstawiono problematykę komfortu cieplnego na podstawie pomiarów temperatury, co w tak uproszczonej wersji nie było zaprezentowane w literaturze. Przeprowadzono badania w pomieszczeniach mieszkalnych budynków wybudowanych w technologii tradycyjnej, które wyraźnie obrazują różnice wahań temperatury na różnych kondygnacjach. Ponadto, za pomocą symulacji komputerowych w programie ESP-r, pokazano wpływ wskaźnika utrzymania ciepła na rozrzut temperatury.

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że:

- wyraźny rozrzut wyników temperatury w ciągu doby występuje w pomieszczeniach ostatniej kondygnacji, tj. na poddaszu. Takiego efektu nie zauważa się na niższych kondygnacjach. Powodem jest brak izolacji dachu i jego nagrzewanie się od promieniowania słonecznego w ciągu dnia i wychładzanie w ciągu nocy. Skutkuje to bardzo wysoką temperaturą na poddaszu w ciągu dnia oraz niską w ciągu nocy;

- izolacja termiczna przegród znacznie ogranicza rozrzut temperatury w pomieszczeniach, natomiast jej wpływ na średnią temperaturę w pomieszczeniu jest mniejszy. W starym budownictwie tradycyjnym przyczyną dużych wahań temperatury jest brak izolacji termicznej bądź jej degradacja, dlatego też wymagane są działania poprawiające izolacyjność przegród;

- wskaźnik utrzymania ciepła ma duży wpływ na rozrzut temperatury w pomieszczeniu (różnicę między wartością maksymalną i minimalną). Im większa jest wartość wskaźnika utrzymania ciepła, tym różnica między wartością maksymalną a minimalną temperatury jest mniejsza. Zasadny jest zatem wybór układu ściany o większym wskaźniku utrzymania ciepła. Wskaźnik ten ma natomiast niewielki wpływ na uśrednioną wartość temperatury w pomieszczeniu.

## Literatura

- [1] Karimimoshaver M, Samadpour Shahrak M. The effect of height and orientation of buildings on thermal comfort. *Sustainable Cities and Society*. 2022; 79, 103720.
- [2] Teleghani M, Berardi U. The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. *Urban Climate*. 2018; 24: 449 – 459.
- [3] Wai KM, Yuan C, Lai A, Peter KN. Relationship between pedestrian-level outdoor thermal comfort and building morphology in a high-density city. *Science of the Total Environment*. 2020; 708,134516.
- [4] Chai J, Fan J. Advanced thermal regulating materials and systems for energy saving and thermal comfort in buildings. *Materials Today Energy*. 2022; 24,100925.
- [5] Zhang S, Cheng Y, Fang Z, Huan C, Lin Z. Optimization of room air temperature in stratified-ventilated rooms for both, thermal comfort and energy saving. *Appl. Energy*. 2017; 204: 420 – 431.
- [6] Hsu PC, Song AY, Catrysse PB, Liu C, Peng YC, Xie J, Fan SH, Cui Y. Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile. *Science*. 2016; 353: 1019 – 1023.
- [7] Kaczmarczyk J, Melikov A, Fanger PO. Human response to personalized ventilation and mixing ventilation. *Indoor Air*. 2004; 14: 17 – 29.
- [8] Pokorska-Silva I, Nowoświat A, Fedorowicz L. Identification of thermal parameters of a building envelope based on the cooling process of a building object. *Journal of Building Physics*. 2020; 43 (6): 503 – 527.
- [9] Sozer H. Improving energy efficiency through the design of the building envelope. *Build. Environ*. 2010; 45: 2581 – 2593.
- [10] Wieprzkowicz A, Heim D. Energy performance of dynamic thermal insulation built in the experimental façade system. *Management of Environmental Quality: An International Journal*. 2016; 27 (6): 681 – 694.
- [11] Pászty Z. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*. 2021; 44,1026034.
- [12] Nowoświat A, Pokorska-Silva, I. The influence of thermal mass on the cooling off process of buildings. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 2018, 62 (1), pp. 173 – 179.
- [13] Nowoświat A, Krause P, Miros A. Properties of expanded graphite polystyrene damaged by the impact of solar radiation. *Journal of Building Engineering*. 2021; 34, 101920.
- [14] Heim D. Phase-change material modeling within whole building dynamic simulation. *ASHRAE Transactions*. 2006; 12 (1): 518 – 525.
- [15] Al-Yasiri Q, Szabó M. Energetic and thermal comfort assessment of phase change material passively incorporated building envelope in severe hot Climate: An experimental study. *Applied Energy*. 2022; 314,118957.
- [16] Bojić M, Loveday D. The influence of building thermal behavior on the insulation/masonry distribution in a three-layered construction. *Energy and Building*. 1997; 26: 153 – 157.
- [17] Pokorska-Silva I, Kadela M, Orlik-Koźdoń B, Fedorowicz L. Calculation of building heat losses through slab-on-ground structures based

on soil temperature measured in situ. *Energies*. 2022; 15 (1), 114.

- [18] Krause P, Nowoświat A, Pawłowski K. The impact of internal insulation on heat transport through the wall: Case Study. *Applied Science*. 2020; 10, 7484.

- [19] Fanger PO. *Thermal comfort; Analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press. Copenhagen, Denmark. 1970.

- [20] D'Ambrosio Alfano FR, Olesen BW, Palaela BI, Riccio G. Thermal comfort: design and assessment for energy saving. *Energy and Building*. 2014; 81: 326 – 336.

- [21] Amoabeng KO, Opopo R, Boahen S, Obeng GY. Analysis of indoor set-point temperature of split-type ACs on thermal comfort and energy savings for office buildings in hot-humid climates. *Energy and Built Environment*. 2022; 4 (3): 368 – 376.

- [22] Rincón L, Carrobè A, Martorell I, Medrano M. Improving thermal comfort of earthen dwellings in Sub-Saharan Africa with passive design. *Journal of Building Engineering*. 2019; 24, 100732.

- [23] Hema C, Messan A, Lawane A, Van Moeseke G. Impact of the design of walls of compressed earth blocks on the thermal comfort of housing in hot climate. *Buildings*. 2020; 10 (9), 157.

- [24] Mascaraque MAM, ZPascual FJC, Andreu VP, Guenot GAG. Evaluation of the thermal comfort and energy demand in a building with rammed earth walls in Spain: influence of the use of in situ measured thermal conductivity and estimated values. *Buildings*. 2021; 11 (12), 635.

- [25] Czajkowski Kuźniak Architekci. *Projekt zabudowy i przebudowy budynku jednorodzinnego*. 2019.

- [26] Clarke JA. *Energy Simulation in Building Design*. 2nd ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann. 2001.

- [27] PN-EN ISO 6946:2017-10. *Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metody obliczania*.

- [28] PN-EN 12524:2003. *Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno-wilgotnościowe – Stabelaryzowane wartości obliczeniowe*.

- [29] Kozłowska-Szczęśna T, Błażejczyk K, Krawczyk B. *Human bioclimatology. Methods and their application in research on the bioclimate of Poland*. Warszawa. Polish Academy of Sciences. Institute of Geography and Spatial Organization. 1997.

- [30] Błażejczyk K, Kunert A. *Bioclimatic principles of recreation and tourism in Poland*. 2nd ed. Warszawa, Polish Academy of Sciences. Institute of Geography and Spatial Organization. 2011.

- [31] EN 15251:2007. *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*.

- [32] Al-Yasiri Q., Szabó M. Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis. *Journal of Building Engineering*. 2021, Vol. 36, 102122.

*Publikacja wspierana w ramach rektorskiego grantu projakościowego. Politechnika Śląska, 03/030/RGJ23/0161 oraz BKM-561/RB3/2023.*

*Przyjęto do druku: 18.10.2023 r.*