



*Magdalena Grudzińska*

# Oszklone balkony jako pasywne systemy szklarniowe

Ocena  
funkcjonowania  
w polskich  
warunkach  
klimatycznych



Lublin 2020

MONOGRAFIE

## *Podziękowania*

*Chciałam serdecznie podziękować osobom, których pomoc i życzliwość przyczyniły się do powstania tej pracy:*

*Panu Profesorowi dr. hab. inż. Lechowi Lichołai wraz z zespołem, za umożliwienie przeprowadzenia walidacji programu symulacyjnego,*

*Panu Jackowi Szkałubie, zastępcy Prezesa Zarządu Spółdzielni Mieszkaniowej im. Jana Zamojskiego w Zamościu, za umożliwienie monitoringu temperatury w mieszkaniach, a także uczestnikom badań w Zamościu,*

*Pani Profesor dr. hab. inż. Annie Halickiej i uczestnikom badań w Lublinie,*

*Panu Profesorowi dr. hab. inż. Henrykowi Nowakowi i Panu Profesorowi dr. hab. inż. Lechowi Lichołai, za cenne uwagi przekazane w recenzjach.*



# Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska  
Wydział Budownictwa i Architektury  
ul. Nadbystrzycka 40  
20-618 Lublin

Magdalena Grudzińska

# Oszklone balkony jako pasywne systemy szklarniowe

Ocena funkcjonowania w polskich  
warunkach klimatycznych



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej  
Lublin 2020

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Henryk Nowak

prof. dr hab. inż. Lech Lichołai

Wszystkie fotografie i rysunki zamieszczone w pracy zostały wykonane przez autorkę.

Źródłem pochodzenia danych wykorzystanych w rozdziałach 5 i 9 jest Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2020

ISBN: 978-83-7947-447-9

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej  
[www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa](http://www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa)  
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin  
tel. (81) 538-46-59

Druk: DjaF – 30-092 Kraków, ul. Kmietowicza 1/1  
[www.djaf.pl](http://www.djaf.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

Nakład: 50 egz.

## Spis treści

|                                                                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Wykaz ważniejszych oznaczeń.....                                                                                   | 9          |
| Konwersja jednostek .....                                                                                          | 11         |
| <b>1. Wstęp .....</b>                                                                                              | <b>13</b>  |
| 1.1. Wprowadzenie .....                                                                                            | 13         |
| 1.2. Podstawowe cele i zakres pracy oraz metodyka badań.....                                                       | 16         |
| <b>2. Systemy szklarniowe – historia i badania.....</b>                                                            | <b>19</b>  |
| 2.1. Ogólna charakterystyka systemów szklarniowych .....                                                           | 19         |
| 2.2. Zarys historii systemów szklarniowych.....                                                                    | 22         |
| 2.3. Badania eksperymentalne .....                                                                                 | 29         |
| 2.4. Badania analityczne .....                                                                                     | 37         |
| <b>3. Metody obliczeniowe wyznaczania zysków energetycznych pochodzących od systemów szklarniowych.....</b>        | <b>42</b>  |
| 3.1. Metoda Solar Load Ratio (SLR).....                                                                            | 43         |
| 3.2. Metoda 5000 .....                                                                                             | 48         |
| 3.3. Metody ISO 13790.....                                                                                         | 49         |
| 3.4. Metoda DIN 18599-2 .....                                                                                      | 56         |
| 3.5. Uprozczone metody godzinowe .....                                                                             | 57         |
| 3.6. Symulacje dynamiczne .....                                                                                    | 59         |
| 3.7. Porównanie wybranych metod obliczeniowych.....                                                                | 62         |
| <b>4. Walidacja programów obliczeniowych.....</b>                                                                  | <b>71</b>  |
| 4.1. Ogólne zasady walidacji programów symulacyjnych .....                                                         | 71         |
| 4.2. Rozwój metod walidacyjnych.....                                                                               | 75         |
| 4.2.1. Walidacja doświadczalna .....                                                                               | 77         |
| 4.2.2. Walidacja porównawcza .....                                                                                 | 78         |
| 4.3. Walidacja programu BSim.....                                                                                  | 81         |
| 4.3.1. Walidacja w ramach prac International Energy Agency.....                                                    | 81         |
| 4.3.2. Walidacja własna programu na podstawie pomiarów w komorze badawczej Politechniki Rzeszowskiej.....          | 83         |
| 4.3.3. Walidacja własna na podstawie normy PN-EN ISO 15265.....                                                    | 92         |
| <b>5. Analiza symulacyjna zapotrzebowania na energię w przykładowych mieszkaniach z zabudowanym balkonem .....</b> | <b>102</b> |
| 5.1. Dyskusja założeń przyjętych w modelu symulacyjnym .....                                                       | 103        |
| 5.2. Dane klimatyczne wykorzystane w modelu symulacyjnym .....                                                     | 111        |
| 5.2.1. Typowy Rok Meteorologiczny.....                                                                             | 112        |
| 5.2.2. Rzeczywiste dane klimatyczne.....                                                                           | 114        |
| <b>6. Wyniki symulacji.....</b>                                                                                    | <b>118</b> |
| 6.1. Sposób analizy danych.....                                                                                    | 118        |
| 6.2. Zapotrzebowanie na energię w pomieszczeniach jako wskaźnik skuteczności pozyskiwania energii słonecznej ..... | 123        |
| 6.2.1. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na trzech ścianach obudowy balkonu .....                   | 123        |

|                                                                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2.2. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na jednej ścianie obudowy balkonu .....                        | 134        |
| 6.2.3. Mieszkanie w skrajnej części budynku, oszklenie na trzech ścianach obudowy balkonu .....                        | 151        |
| 6.2.4. Mieszkanie w skrajnej części budynku, oszklenie na jednej ścianie obudowy balkonu .....                         | 160        |
| <b>7. Efektywność systemów szklarniowych.....</b>                                                                      | <b>175</b> |
| 7.1. Sprawność energetyczna.....                                                                                       | 175        |
| 7.2. Czynniki korekty temperatury .....                                                                                | 182        |
| <b>8. Możliwość przegrzewania mieszkań z systemem szklarniowym .....</b>                                               | <b>186</b> |
| 8.1. Kryteria oceny przegrzewania.....                                                                                 | 186        |
| 8.2. Warunki w okresie letnim w wybranych wariantach mieszkań.....                                                     | 190        |
| 8.2.1. Mieszkanie z otwartym balkonem.....                                                                             | 190        |
| 8.2.2. Mieszkanie z zabudowanym balkonem w części środkowej budynku, oszklenie na trzech ścianach obudowy.....         | 191        |
| 8.2.3. Mieszkanie z zabudowanym balkonem w części środkowej budynku, oszklenie na jednej ścianie obudowy balkonu ..... | 194        |
| 8.2.4. Mieszkanie z zabudowanym balkonem w skrajnej części budynku, oszklenie na trzech ścianach obudowy balkonu ..... | 197        |
| 8.2.5. Mieszkanie z zabudowanym balkonem w skrajnej części budynku, oszklenie na jednej ścianie obudowy balkonu .....  | 199        |
| <b>9. Monitoring mieszkań z zabudowanymi balkonami .....</b>                                                           | <b>202</b> |
| 9.1. Zakres badań .....                                                                                                | 202        |
| 9.2. Wyniki monitoringu .....                                                                                          | 210        |
| 9.2.1. Efekt buforowy przestrzeni oszklonej .....                                                                      | 212        |
| 9.2.2. Ocena przegrzewania pomieszczeń.....                                                                            | 220        |
| <b>10. Wnioski końcowe .....</b>                                                                                       | <b>227</b> |
| 10.1. Kształtowanie przestrzeni słonecznej z uwagi na całoroczny bilans energetyczny .....                             | 227        |
| 10.2. Możliwość przegrzewania pomieszczeń .....                                                                        | 231        |
| 10.3. Badania doświadczalne .....                                                                                      | 232        |
| 10.4. Kierunki dalszych badań.....                                                                                     | 233        |
| 10.5. Podsumowanie.....                                                                                                | 234        |
| <b>Bibliografia .....</b>                                                                                              | <b>235</b> |
| Streszczenie .....                                                                                                     | 257        |
| Abstract.....                                                                                                          | 259        |

### Wykaz ważniejszych oznaczeń:

|            |                                                                                        |                     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| $A$        | – powierzchnia                                                                         | $[m^2]$             |
| $A_g$      | – powierzchnia oszklenia                                                               | $[m^2]$             |
| $A_{sol}$  | – efektywna powierzchnia zbierająca oszklenia                                          | $[m^2]$             |
| $C_m$      | – wewnętrzna pojemność cieplna pomieszczenia                                           | $[J/K]$             |
| $F_{sh,e}$ | – czynnik redukcji promieniowania ze względu na zacinienie                             | $[-]$               |
| $H_{tr}$   | – współczynnik strat ciepła przez przenikanie                                          | $[W/K]$             |
| $H_{ve}$   | – współczynnik strat ciepła przez wentylację                                           | $[W/K]$             |
| $I$        | – natężenie promieniowania słonecznego                                                 | $[W/m^2]$           |
| $I_h$      | – natężenie promieniowania całkowitego na płaszczyźnie poziomej na powierzchni Ziemi   | $[W/m^2]$           |
| $I_{hb}$   | – natężenie promieniowania kierunkowego na płaszczyźnie poziomej na powierzchni Ziemi  | $[W/m^2]$           |
| $I_{hd}$   | – natężenie promieniowania rozproszonego na płaszczyźnie poziomej na powierzchni Ziemi | $[W/m^2]$           |
| $I_{sol}$  | – natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni przegrody budowlanej             | $[W/m^2]$           |
| $Q_{C,nd}$ | – zapotrzebowanie na energię do chłodzenia                                             | $[MJ], [kWh]$       |
| $Q_{H,nd}$ | – zapotrzebowanie na energię do ogrzewania                                             | $[MJ], [kWh]$       |
| $Q_{H,ht}$ | – całkowite przenoszenie ciepła z przestrzeni ogrzewanej                               | $[MJ], [kWh]$       |
| $Q_{H,gn}$ | – całkowite zyski ciepła w przestrzeni ogrzewanej                                      | $[MJ], [kWh]$       |
| $Q_{sol}$  | – promieniowanie słoneczne                                                             | $[J]$               |
| $R$        | – opór cieplny                                                                         | $[(m^2 \cdot K)/W]$ |
| $R_{se}$   | – opór przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody                        | $[(m^2 \cdot K)/W]$ |
| $R_{si}$   | – opór przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody                        | $[(m^2 \cdot K)/W]$ |
| $U$        | – współczynnik przenikania ciepła                                                      | $[W/(m^2 \cdot K)]$ |
| $b_{tr}$   | – czynnik korekty temperatury                                                          | $[-]$               |

|                  |                                                                         |                      |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| $c_p$            | – ciepło właściwe powietrza                                             | [J/(kg·K)]           |
| $g$              | – współczynnik przepuszczania energii słonecznej przez oszklenie        | [-]                  |
| $k_T$            | – współczynnik przejrzystości atmosfery                                 | [-]                  |
| $l$              | – długość mostka termicznego                                            | [m]                  |
| $n$              | – ilość wymian powietrza                                                | [1/s]                |
| $t$              | – długość kroku obliczeniowego                                          | [jednostka czasu]    |
| $v$              | – objętość powietrza w danej strefie                                    | [m <sup>3</sup> ]    |
| $\Phi$           | – strumień ciepła                                                       | [W]                  |
| $\Phi_u$         | – średnie zyski słoneczne w objętości szklarni                          | [W]                  |
| $\alpha$         | – absorpcyjność powierzchni                                             | [-]                  |
| $\gamma_H$       | – stosunek zysków ciepła do strat                                       | [-]                  |
| $\delta$         | – deklinacja Słońca                                                     | [stopnie]            |
| $\eta$           | – sprawność systemu pasywnego                                           | [-]                  |
| $\eta_{H,gn}$    | – czynnik wykorzystania zysków ciepła                                   | [-]                  |
| $\theta_i$       | – temperatura wewnętrzna                                                | [°C]                 |
| $\theta_{int,H}$ | – nastawa temperatury w pomieszczeniu mieszkalnym dla okresu ogrzewania | [°C]                 |
| $\theta_e$       | – temperatura zewnętrzna                                                | [°C]                 |
| $\theta_{rm}$    | – ciągła średnia temperatura w danym dniu                               | [°C]                 |
| $\theta_s$       | – temperatura powietrza w szklarni                                      | [°C]                 |
| $\rho$           | – odbijalność powierzchni                                               | [-]                  |
| $\rho_p$         | – gęstość powietrza                                                     | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\rho_s$         | – odbijalność promieniowania słonecznego                                | [-]                  |
| $\tau$           | – stała czasowa strefy budynku                                          | [h]                  |
| $\tau$           | – transmisyjność                                                        | [-]                  |
| $\tau_s$         | – transmisyjność promieniowania słonecznego                             | [-]                  |
| $\tau_{vis}$     | – transmisyjność promieniowania widzialnego                             | [-]                  |
| $\phi$           | – szerokość geograficzna                                                | [stopnie]            |
| $\psi$           | – liniowy współczynnik przenikania ciepła mostków termicznych           | [W/(m·K)]            |
| $\omega$         | – kąt godzinny Słońca                                                   | [stopnie]            |



### Konwersja jednostek:

#### USC → SI

$$1 \text{ ft} = 0,305 \text{ m}$$

$$1 \text{ ft}^2 = 0,093 \text{ m}^2$$

$$^{\circ}\text{F} = 32 + 1,800 \cdot (^{\circ}\text{C})$$

$$1 \text{ Btu} = 1055,056 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 0,293 \text{ Wh}$$

$$1 \text{ Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^{\circ}\text{F}) = 1,731 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$1 \text{ Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^{\circ}\text{F}) = 5,678 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

#### SI → USC

$$1 \text{ m} = 3,279 \text{ ft}$$

$$1 \text{ m}^2 = 10,764 \text{ ft}^2$$

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \cdot 0,556$$

$$1 \text{ J} = 9,479 \cdot 10^{-4} \text{ Btu}$$

$$1 \text{ Wh} = 3,412 \text{ Btu}$$

$$1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) = 0,578 \text{ Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^{\circ}\text{F})$$

$$1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) = 0,176 \text{ Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^{\circ}\text{F})$$

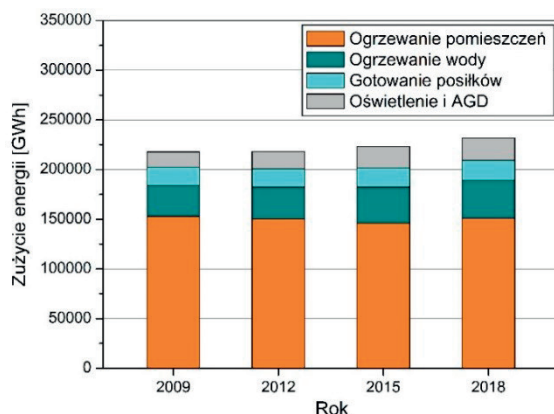


# 1. Wstęp

## 1.1. Wprowadzenie

Od początku XXI wieku rośnie świadomość konieczności zaangażowania się w zmniejszenie zużycia energii w budynkach zarówno wśród ich użytkowników, jak i zarządców nieruchomości czy uczestników procesu budowlanego [16, 76, 109, 270]. Utrzymanie zapotrzebowania na energię na odpowiednio niskim poziomie w niedalekiej przyszłości może okazać się głównym wyzwaniem stojącym przed projektantami i wykonawcami. Zgodnie z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego [62], państwa członkowskie Unii Europejskiej zobowiązane są do zagwarantowania, że wszystkie nowe budynki powstające po 31 grudnia 2020 roku będą budynkami o niemal zerowym zużyciu energii. Wymagania te podyktowane są przede wszystkim koniecznością ograniczenia emisji dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych, przyczyniających się do podwyższenia temperatury powierzchni Ziemi i narastających zmian klimatu. Wyczerpywanie się surowców odnawialnych i rosnące zanieczyszczenie środowiska produktami ich przetwarzania są również motorem zmian w postrzeganiu problemów zużycia energii i możliwości wykorzystania źródeł niekonwencjonalnych.

Działania w sektorze budowlanym uznawane są za jedno z głównych źródeł możliwości ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> i redukcji efektu cieplarnianego [31, 43]. Według danych Intergovernmental Panel on Climate Change [43], w 2010 budynki zużywały łącznie 32% energii końcowej na świecie, z czego 24% przypadało na budynki mieszkalne, a 8% na budynki użyteczności publicznej. W krajach Unii Europejskiej budynki konsumują około 45% energii końcowej [62]. Dominujące znaczenie w tym procesie ma faza eksploatacji obiektów, a największą część bilansu energetycznego budynków mieszkalnych stanowi ogrzewanie pomieszczeń (rys. 1.1). Według krajowych danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) [311], ogrzewanie pochłania obecnie około 65% energii końcowej zużywanej przez gospodarstwa domowe, a głównymi nośnikami energii są paliwa stałe i ciepło sieciowe, wykorzystywane odpowiednio przez 45,4% i 40,4% gospodarstw domowych.



**Rys. 1.1.** Struktura zapotrzebowania na energię w budynkach mieszkalnych w Polsce. Opracowano na podstawie [311].

Ograniczenie zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków jest w dużej mierze efektem utrzymania izolacyjności cieplnej obudowy obiektu na określonym poziomie oraz stosowania wysokosprawnych systemów grzewczych i wentylacyjnych. Wielu specjalistów podkreśla jednak, że przejście do poziomu budynków o niemal zerowym zużyciu energii wymaga nie tylko ochrony przed stratami ciepła, ale również racjonalnego wykorzystania biernych zysków energii pochodzących z promieniowania słonecznego [144, 162, 282]. Zyski słoneczne są ważnym elementem bilansu energetycznego pomieszczeń, a w budynkach niskoenergetycznych i pasywnych przystosowanie do ich pasywnego pozyskiwania jest zalecane jako główny i podstawowy sposób wykorzystania niekonwencjonalnych źródeł energetycznych [282].

Mimo, że systemy pasywne używane są od lat i funkcjonują w każdym budynku, np. w pomieszczeniach z oknami, świetlikami lub dobudowanymi szklarniami czy ogrodami zimowymi, w większości obiektów trudno jest mówić o świadomym ich projektowaniu. Podstawowe parametry decydujące o efektywności systemu, takie jak zdolność transmisji energii słonecznej lub pojemność cieplna obudowy obiektu, na ogół dobierane są intuicyjnie przez projektantów bez przeprowadzania szczegółowej oceny skuteczności proponowanych rozwiązań. Taki stan rzeczy nie pozwala wykorzystać w pełni potencjału szklarni w sezonie grzewczym, a w okresie letnim niepotrzebnie zwiększa obciążenie cieplne pomieszczeń mieszkalnych, powodując przegrzewanie pomieszczeń i okresowy lub długotrwały dyskomfort użytkowników [143, 144, 145]. Jest to szczególnie uciążliwe w perspektywie ocieplenia klimatu i fal upałów odnotowywanych w lecie [7, 16, 25, 50, 114, 115, 174, 228, 251, 252, 253].

Przedmiotem szczególnego zainteresowania autorki są pasywne systemy szklarniowe oraz możliwości ich wykorzystania w budynkach wielorodzinnych.

Budynki te stanowią główną część istniejącej i nowoprojektowanej zabudowy mieszkalnej w Polsce – wg danych GUS [311] blisko 56% mieszkań znajduje się w budynkach wielorodzinnych. Systemy szklarniowe w postaci oszklonych balkonów lub loggii mogą być wykonywane zarówno w budynkach istniejących jak i nowo wznoszonych (rys. 1.2, 1.3, 1.4). Ta elastyczność jest szczególnie ważna z punktu widzenia możliwości szybkiego i stosunkowo taniego podwyższenia standardu energetycznego wielu obiektów istniejących – mimo ustaleń prawnych zmierzających do ograniczenia energochłonności budynków projektowanych w niedalekiej przyszłości, potrzeby energetyczne mieszkań już powstałych są ustalone na określonym poziomie, w znaczący sposób zwiększając obciążenie środowiska naturalnego [43].



**Rys. 1.2.** Oszklone balkony dobudowane w obiekcie istniejącym (Dania, Aalborg).

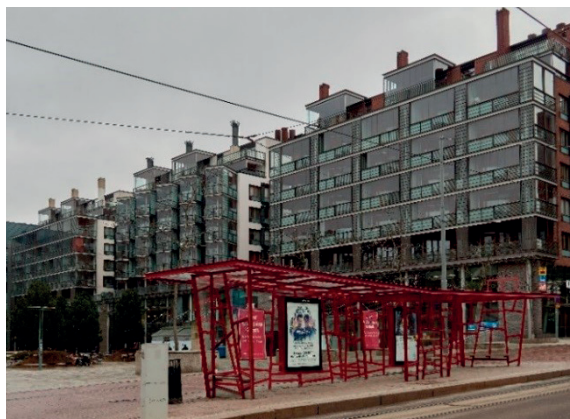


**Rys. 1.3.** Zabudowa loggii zrealizowana w obiekcie istniejącym (Francja, Lyon).

Systemy szklarniowe mają również wiele zalet użytkowych, łącząc ochronę cieplną i akustyczną pomieszczeń z dużą atrakcyjnością architektoniczną (rys. 1.4, 1.5). Ich możliwości, zdaniem autorki, nie są w pełni wykorzystywane, między innymi z powodu braku szerszych analiz funkcjonowania i efektywności energetycznej w krajowych warunkach klimatycznych. Według raportu [31] badającego powiązania między budownictwem a zmianami klimatu, brak dogłębnych informacji na temat rozwiązań sprzyjających oszczędności energii jest jedną z głównych przeszkód w zwiększeniu efektywności energetycznej obiektów budowlanych. Potrzebne więc i uzasadnione jest podjęcie tego tematu, zwiększające świadomość korzyści jakie dają systemy szklarniowe. Praca niniejsza wpisuje się także w krajowe działania zmierzające do zwiększenia liczby budynków o niemal zerowym zużyciu energii i zwiększenia wykorzystania energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych [152, 153].



**Rys. 1.4.** Oszklone balkony w obiekcie nowoprojektowanym (Dania, Aalborg).



**Rys. 1.5.** Oszklone balkony w zabudowie śródmiejskiej (Finlandia, Helsinki).

## 1.2. Podstawowe cele i zakres pracy oraz metodyka badań

Specyfiką pasywnych systemów szklarniowych jest to, że przestrzeń szklarni sąsiadującej z budynkiem nie jest ogrzewana. Pełni ona funkcję kolektora słonecznego, z założenia nie obciążając systemu grzewczego pomieszczeń. Przepisy krajowe dotyczące projektowania przegród zewnętrznych [211] nie precyzują wymagań stawianych przegrodom oddzielającym pomieszczenia nieogrzewane od środowiska zewnętrznego, nie jest także planowane wprowadzenie takich wymagań po roku 2020. Projektując przestrzeń słoneczną projektanci kierują się najczęściej kryteriami ekonomicznymi lub estetycznymi, pomijając zagadnienia związane z wpływem szklarni na bilans energetyczny budynku.

W związku z powyższym, głównymi celami pracy są:

- analiza (na drodze symulacji komputerowych i badań doświadczalnych) w jaki sposób zabudowa balkonów wpływa na wymianę ciepła i warunki termiczne w mieszkaniach w polskich warunkach klimatycznych,
- ustalenie, jakie rozwiązania są najbardziej korzystne z punktu widzenia ograniczenia całorocznego zapotrzebowania na energię.

Zakres pracy obejmuje:

- prezentację aktualnego stanu wiedzy na temat systemów szklarniowych w budynkach mieszkalnych, czyli ich ogólną charakterystykę, krótki rys historyczny, podstawowe zasady projektowania, dotychczasowe badania polskie i zagraniczne oraz metody uwzględniania przestrzeni słonecznych w bilansie energetycznym pomieszczeń;
- szczegółową ocenę wybranych wariantów obudowy szklarni w przykładowym mieszkaniu o różnej lokalizacji w budynku i położeniu względem stron świata, ze szczególnym zwróceniem uwagi na wpływ powłok spektralnie selektywnych na bilans energetyczny przestrzeni słonecznej i przyległych pomieszczeń; wstępne badania autorki [80, 81, 82, 83, 84, 85, 87, 88] potwierdziły, że izolacyjność cieplna obudowy szklarni oraz właściwości optyczne oszklenia mają znaczący wpływ na zapotrzebowanie na energię w pomieszczeniach ogrzewanych; w większości dotychczasowych prac badawczych brano pod uwagę głównie oszklenia zwykłe lub sporadycznie przyjmowano oszklenia opisywane jako „low-e” (bez odniesienia do ich cech optycznych), co wynikało z małej dostępności powłok modyfikujących właściwości oszkleń; rozwój techniczny w tej dziedzinie skłania do rozszerzenia dotychczasowych analiz i uwzględnienia możliwości regulacji bilansu cieplnego dzięki powłokom funkcyjnym o zmodyfikowanych właściwościach transmisji promieniowania w danym zakresie widmowym;
- całoroczną ewaluację funkcjonowania systemu szklarniowego w celu wyboru rozwiązań najbardziej korzystnych z punktu widzenia minimalizacji zapotrzebowania na ciepło i chłód, oraz ustalenie jakiego rzędu oszczędności energetyczne można uzyskać dzięki systemom szklarniowym w polskim klimacie;
- określenie efektywności systemów szklarniowych z oszkleniami o zróżnicowanych właściwościach optycznych przy pomocy autorskiej metody odnoszącej się do natężenia promieniowania padającego na obudowę od strony zewnętrznej; prezentowane w literaturze sposoby odwołują się najczęściej do natężenia promieniowania przepuszczonego do wnętrza szklarni, przyjmując jako miarę jego utylizacji ilość energii absorbowanej przez obudowę – takie podejście było uzasadnione kiedy stosowano głównie oszklenia zwykłe niepowlekane o porównywalnej przepuszczalności, ale w przypadku zróżnicowanych zdolności transmisji jest ono niewystarczające;

- rozpoznanie warunków wewnętrznych w przestrzeni mieszkalnej sąsiadującej ze szklarnią pod kątem komfortu wewnętrznego i możliwości adaptacyjnych w okresie wysokich temperatur zewnętrznych i fal upałów odnotowywanych w lecie, niezbędne w perspektywie antropogenicznych zmian klimatu.

W pracach posłużono się (między innymi) dynamicznymi symulacjami komputerowymi wykonywanymi z krótszym niż godzinowy krokiem obliczeniowym. Programy symulacyjne są coraz częściej stosowanym narzędziem badawczym, szczególnie zalecanym do analiz porównawczych ze względu na możliwość uzyskania wyników przy jednakowych warunkach brzegowych i początkowych [42, 63]. Na początkowym etapie badań przeprowadzono walidację eksperymentalną programu, modelując przebieg temperatury w komorach badawczych Politechniki Rzeszowskiej. Walidację uzupełniono poprzez analizy porównawcze zapotrzebowania na energię wg normy [238].

Symulacje i obliczenia wykonano korzystając z wieloletnich uśrednionych danych klimatycznych zawartych w Typowym Roku Meteorologicznym [202]. Ocenę możliwości przegrzewania w ekstremalnych warunkach letnich oparto na rzeczywistych danych pomiarowych z lat 2001 – 2015, zawartych w bazie danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW – PIB).

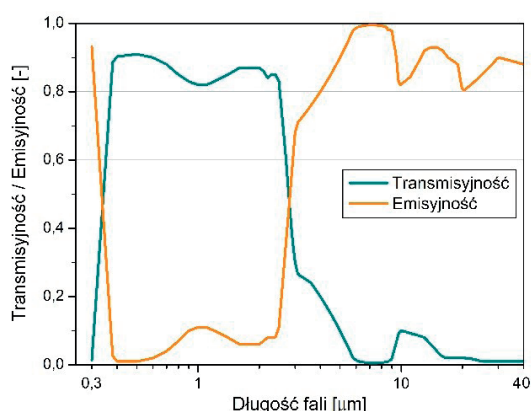
Częścią badań nad systemami szklarniowymi był także monitoring temperatury w mieszkaniach z oszklonymi balkonami, zlokalizowanych w budynkach wielorodzinnych w Lublinie i Zamościu. Rejestracja temperatury odbywała się w okresach 9. miesięcznych w roku 2017 i 2018, obejmując część sezonu grzewczego i miesiące letnie. Na podstawie danych pomiarowych ustalono wpływ systemów szklarniowych na straty ciepła w pomieszczeniach mieszkalnych oraz oceniono warunki termiczne panujące w lecie.



## 2. Systemy szklarniowe – historia i badania

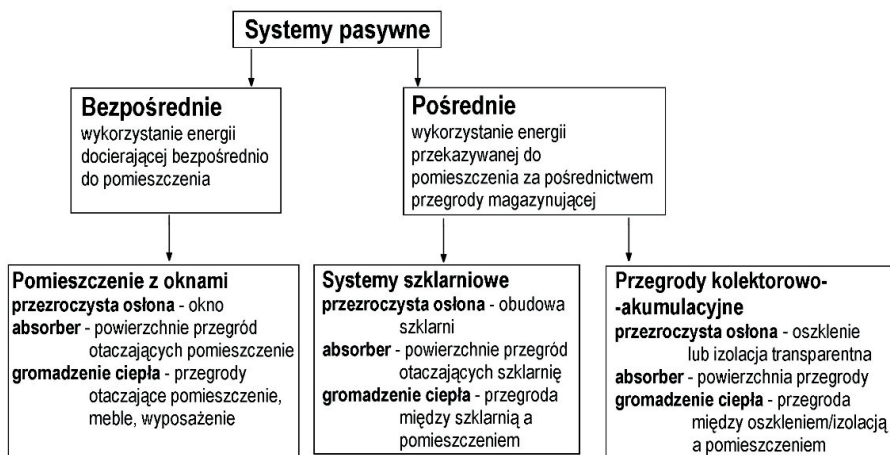
### 2.1. Ogólna charakterystyka systemów szklarniowych

Pasywna zamiana promieniowania słonecznego na energię ciepłą, tzw. konwersja fototermiczna, zachodzi w budynkach dzięki efektowi szklarniowemu. Słoneczne promieniowanie krótkofalowe o długości fali w zakresie  $0,28 - 3,00 \mu\text{m}$  (podział wg [235]) przepuszczane przez elementy przezroczyste jest pochłaniane na powierzchni przegród budowlanych, powodując wzrost ich temperatury i zwiększoną emisję długofalowego promieniowania podczerwonego (promieniowania ciepłego o długości fali w zakresie  $3 - 1000 \mu\text{m}$ ). Dzięki temu wzrasta temperatura powietrza w pomieszczeniu, szczególnie jeżeli ograniczona jest jego wymiana przez wentylację. Przepuszczalność szkła w zakresie dalekiej podczerwieni jest znikoma (rys. 2.1), więc przekazywanie energii na zewnątrz odbywa się głównie poprzez promieniowanie, konwekcję i przewodzenie w warstwie szkła, podobnie jak w nieprzezroczystych przegrodach zewnętrznych [11, 35, 61, 161, 296]. Zdolność oszklenia do odbicia promieniowania ciepłego można zwiększyć, stosując powłoki spektralnie selektywne o niskiej emisyjności (i absorpcyjności) w zakresie promieniowania długofalowego.



Rys. 2.1. Transmisyjność i emisyjność szkła zwykłego determinująca efekt szklarniowy. Opracowano na podstawie [296].

W systemach pasywnych (biernych) procesy pozyskiwania i przekazywania energii powinny odbywać się dzięki samej konstrukcji budynku, bez pomocy dodatkowych urządzeń mechanicznych czy elektrycznych. Do grupy systemów pasywnych zalicza się systemy zysków bezpośrednich oraz pośrednich, obejmujące, między innymi, systemy szklarniowe i przegrody kolektorowo-akumulacyjne [39, 192, 164]. Podstawowymi częściami składowymi każdego systemu pasywnego (rys. 2.2) są: przezroczyste osłony, powierzchnie absorbujące promieniowanie i elementy magazynujące pozyskaną energię.



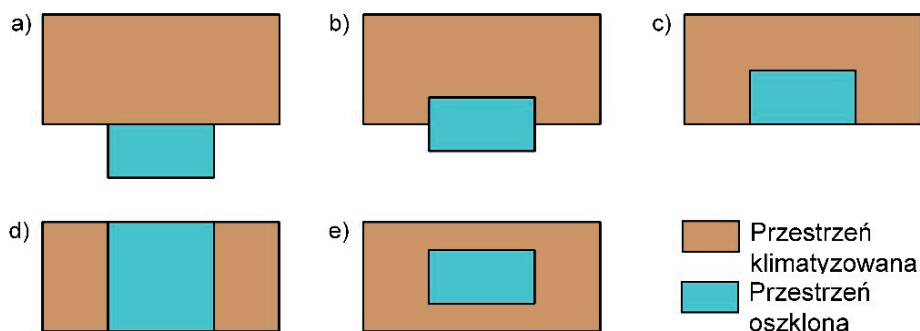
**Rys. 2.2.** Podstawowy podział systemów pasywnych i ich główne elementy składowe. Opracowano na podstawie [127].

System szklarniowy do konwersji promieniowania słonecznego wykorzystuje przeszkloną przestrzeń, przylegającą do budynku i oddzieloną od jego wnętrza przegrodą akumulującą ciepło. Przestrzeń słoneczna jest jednocześnie rodzajem kolektora słonecznego i bufora termicznego, łącząc pozyskiwanie energii słonecznej z ochroną cieplną części mieszkalnej. Szklarnia modyfikuje bilans energetyczny budynku poprzez [39, 40, 163, 164]:

- zmniejszenie natężenia promieniowania słonecznego docierającego do elewacji,
- zmniejszenie strat ciepła przez przegrodę pomiędzy pomieszczeniem ogrzewanym a szklarnią, związane ze wzrostem temperatury we wnętrzu szklarni na skutek efektu szklarniowego,
- ograniczenie udziału w stratach ciepła mostków termicznych w miejscu połączenia płyty balkonu ze ścianą zewnętrzną,
- przekazywanie na drodze promieniowania i konwekcji ciepła pochłanianego przez przegrodę akumulacyjną do sąsiednich pomieszczeń,
- wstępne ogrzanie powietrza wentylacyjnego przepływającego ze szklarni do wnętrza sąsiednich pomieszczeń.

Sama szklarnia nie jest ogrzewana i może podlegać znacznym wahaniom temperatury, co ogranicza jej wykorzystanie w celach użytkowych w okresie bardzo niskich lub wysokich temperatur zewnętrznych. Warunki panujące w przestrzeni słonecznej są bardziej zależne od środowiska zewnętrznego niż warunki w ogrzewanej lub chłodzonej strefie mieszkalnej [159].

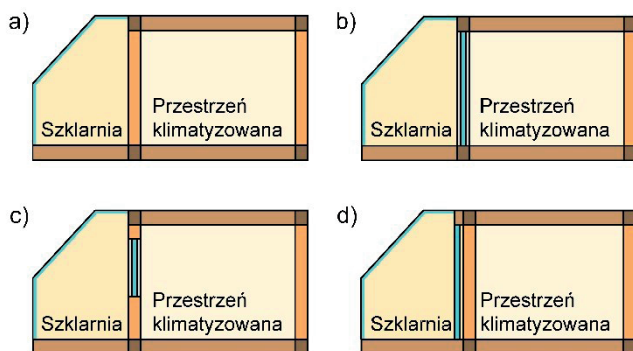
Typologię systemów szklarniowych w zależności od sposobu połączenia z bryłą budynku przedstawiono na rysunku 2.3. Najprostsze i najczęściej stosowane przestrzenie słoneczne mają wysokość odpowiadającą jednej kondygnacji lub dzieloną na poziomie stropów (np. oszklone balkony). Mogą być one dostawione do budynku od zewnątrz albo w całości lub częściowo z nim zintegrowane. Szklarnie zewnętrzne są połączone z budynkiem jedną ścianą, która pełni też rolę przegrody akumulacyjnej, a pozostałe przegrody (pełne lub oszklone) wystawione są na działanie czynników atmosferycznych. Szklarnie zintegrowane z budynkiem mają większą powierzchnię przegród sąsiadujących z częścią mieszkalną, co sprawia że użytkowanie ich może być bardziej komfortowe w okresach przejściowych. Według [299] są one także mniej narażone na przegrzewanie w lecie, ze względu na mniejszą powierzchnię oszkloną stykającą się ze środowiskiem zewnętrznym. Do systemów szklarniowych zalicza się też atria, czyli przeszkłone dziedzińce otoczone pomieszczeniami użytkowymi, często o wysokości kilku kondygnacji.



**Rys. 2.3.** Podział systemów szklarniowych ze względu na połączenie z bryłą budynku: a) zewnętrzny, b) częściowo zintegrowany, c) zintegrowany, d) wewnętrzny, e) atrium. Opracowano na podstawie [40, 299].

Rodzaje przegród pomiędzy przestrzenią buforową a ogrzewanym wnętrzem budynku mogą być różne, a systemy szklarniowe mogą łączyć się z systemami zysków bezpośrednich lub przegrodami kolektorowo-akumulacyjnymi [40]. W klasycznym rozwiązaniu zaproponowanym przez Balcomba [8, 19, 126] oszklona przestrzeń przylegała do masywnej przegrody pełnej, tworząc rodzaj kolektora słonecznego z przezroczystą osłoną i elementem magazynującym ciepło (rys. 2.4.a). W ścianie oddzielającej mogą być wykonane otwory wentylacyjne

pozwalające na przepływ powietrza i dodatkowe przekazywanie ciepła ze szklarni. Inną formą przegrody pośredniej jest przegroda oszklona, przekazująca promieniowanie słoneczne do pomieszczenia mieszkalnego w postaci krótkofalowej. Elementami akumulującymi ciepło staje się wówczas obudowa pomieszczenia, czyli ściany, strop i podłoga (rys. 2.4.b). W praktyce bardzo często można spotkać połączenie tych dwóch systemów, kiedy w przegrodzie oddzielającej umieszczone są okna i drzwi balkonowe przepuszczające promieniowanie słoneczne i umożliwiające korzystanie ze strefy buforowej (rys. 2.4.c). Otwieranie okien i drzwi pozwala na przepływ powietrza między pomieszczeniami, intensyfikując wymianę ciepła. Funkcję ściany oddzielającej może też spełniać przegroda kolektorowo-akumulacyjna (ściana Trombe'a), z przezroczystą osłoną od strony zewnętrznej i częścią magazynującą ciepło od wewnątrz (rys. 2.4.d).



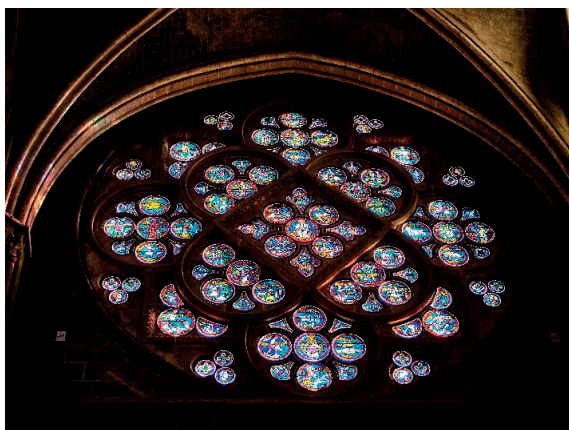
**Rys. 2.4.** Podział systemów szklarniowych ze względu na rodzaj przegrody oddzielającej: a) przegroda pełna, b) oszklenie, c) przegroda masywna z elementami stolarki, d) przegroda kolektorowo-akumulacyjna. Opracowano na podstawie [40, 299].

## 2.2. Zarys historii systemów szklarniowych

Najstarsze wzmianki o osłanianiu otworów okiennych szkłem lub płytkami z miki, selenitu lub marmuru, oraz o wykorzystaniu tych materiałów (osadzonych w konstrukcjach drewnianych) do przekrywania dziedzińców pochodzą z początku naszej ery z Rzymu i Grecji [304]. Z tego okresu znane są też pierwsze przekazy o cieplarniach i ogrodach zimowych [71, 304]. Po upadku imperium rzymskiego umiejętność wytwarzania szkła w Europie stopniowo zanikała [250]. Jej odrodzenie nastąpiło pod koniec średniowiecza, i od tego czasu szkło stało się niezastąpionym elementem budowy sakralnych i świeckich (rys. 2.5, 2.6, 2.7).



Rys. 2.5. Naczynia szklane z początku naszej ery (Węgry, Budapeszt, zbiory Muzeum Aquincum).



Rys. 2.6. Witraż gotycki z XIII wieku (Szwajcaria, Lozanna, katedra Notre-Dame).



Rys. 2.7. Zastosowanie szkła w architekturze współczesnej (Niemcy, Berlin, dziedziniec Sony Center).



Pierwotnie szklarnie stosowane były w rolnictwie i ogrodnictwie, w celu przyspieszenia wzrostu roślin lub hodowli gatunków wymagających temperatur wyższych od występujących w danej strefie klimatycznej. Sztuka wznoszenia ogrzewanych i oszklonych budynków w ogrodach botanicznych, służących do przechowywania w zimie wrażliwych roślin przypomniana została po okresie starożytnym we Włoszech w XIII i XIV wieku [71, 250, 256]. Oranżerie i pomarańczarnie znalazły od tego czasu stałe miejsce w architekturze europejskiej. Początkowo miały one postać niewielkich budynków o oszklonych, otwieranych przegrodach południowych i masywnych, murowanych ścianach od strony północnej [71]. Rozwiązania tego typu wykorzystywały do akumulacji ciepła także skarpy ziemne, umocnione przegrodami z cegieł (rys. 2.8).



**Rys. 2.8.** Szklarnie w skarpie skierowanej na południe służące do hodowli figowców (Niemcy, Poczdam, ogród tarasowy w parku Sanssouci).

Od funkcji użytkowych szklarnie ewoluowały w XVII i XVIII wieku do pełnienia funkcji reprezentacyjnych, świadczących o statusie majątkowym właścicieli. Oranżerie XVIII. i XIX. wieczne to na ogół okazałe i bogato dekorowane budynki, wyposażone w wysokie okna umieszczone na południowej elewacji (rys. 2.9).

Połączenie szkła z nośnymi konstrukcjami z żelaza w XIX wieku pozwoliło na wznoszenie obiektów o znacznych rozpiętościach i wysokościach, oszklonych na całej powierzchni przegród zewnętrznych (rys. 2.10, 2.11). Zaczęto wtedy zwracać uwagę na wpływ kąta padania promieni słonecznych na efektywność szklarni, stąd pojawiły się obiekty o kształcie walcowym lub półsferycznym, dostosowanym do toru Słońca [301].



Rys. 2.9. Neorenesansowa Nowa Oranżeria (Niemcy, Poczdam, park Sanssouci).



Rys. 2.10. Palmiarnia o konstrukcji nośnej z żelaza (Austria, Wiedeń, pałac Schönbrunn).



Rys. 2.11. Oranżeria półsferyczna (Czechy, pałac w Lednicach).

Druga połowa XIX. wieku to stopniowy spadek popularności ogrodów zimowych, spowodowany wysokimi kosztami ich utrzymania i rosnącą podażą stosunkowo tanich owoców egzotycznych sprowadzanych statkami do Europy [71]. W okresie tym zapoczątkowano natomiast łączenie przestrzeni oszklonej z przestrzenią mieszkalną. „Pokoje słoneczne” sąsiadowały na ogół z salonami od strony południowej, i wykorzystywano je do okresowego dogrzewania pomieszczeń. Poza pełnieniem funkcji praktycznych były także miejscem integracji z przyrodą i środowiskiem naturalnym, stanowiąc często oryginalne i atrakcyjne elementy architektoniczne (rys. 2.12) [256]. Osiągnięcia opisanego okresu zalicza się wg [304] do pierwszej generacji architektury słonecznej.



**Rys. 2.12.** *Przestrzeń słoneczna w architekturze z początku XX. wieku – willa letniskowa Szajki Światłowskiego (Łódź, Skansen Łódzkiej Architektury Drewnianej).*

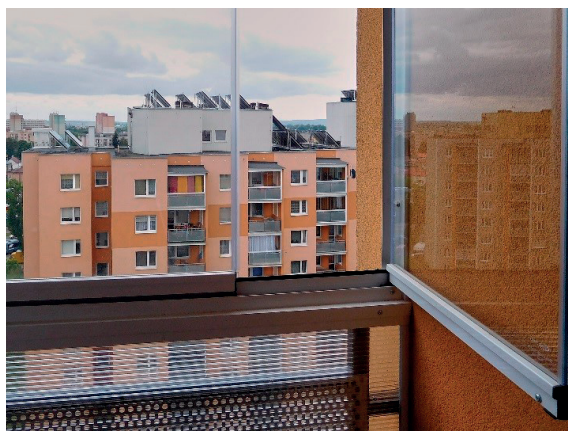
Druga generacja architektury słonecznej to czas od końca XX wieku do chwili obecnej, kiedy to światowe kryzysy energetyczne stały się motorem ponownego zainteresowania wykorzystaniem promieniowania słonecznego i innych odnawialnych źródeł energii w budownictwie i architekturze [304]. Obecnie zabudowane balkony coraz częściej można zobaczyć w budynkach nowopowstających i istniejących, szczególnie na obszarach miejskich o dużym natężeniu ruchu. Spełniają one nie tylko funkcje użytkowe czy związane z oszczędnością energii, ale także chronią przed hałasem (rys. 2.13) [29].





**Rys. 2.13.** Oszklone loggie w budynku przy ulicy o dużym natężeniu ruchu (Lublin).

Współcześnie zabudowa balkonów może być realizowana na różne sposoby. Wśród systemów dostępnych na rynku można wyróżnić zabudowę bezramową lub ramową [29]. W systemach bezramowych stosuje się szyby hartowane o większej grubości – na ogół od 6 do 12 mm. Osadzone są one w profilach dolnych i górnych, bez widocznych połączeń pionowych między szybami. Jest to rozwiązanie o wysokich walorach estetycznych, ale też i dość wysokiej cenie. W zabudowie ramowej pojedyncze szyby o grubości od 4 do 6 mm lub szyby zespolone jednokomorowe osadzone są w obwodowych profilach aluminiowych. W obu systemach elementy oszklone mogą być przesuwane lub otwierane poprzez obrót skrzydła względem pionowej krawędzi (rys. 2.14), a wentylacja przestrzeni balkonu odbywa się dzięki kilkumilimetrowym szczelinom pomiędzy szybami. W niektórych systemach oferowane są także dodatkowe zabezpieczenia – np. przed otwarciem z zewnątrz lub przed otwarciem przez wiatr.

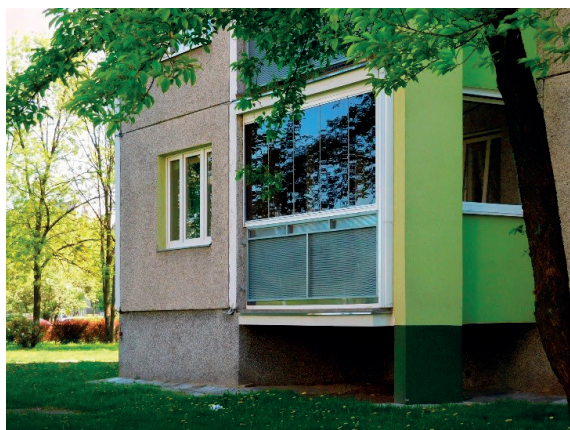


**Rys. 2.14.** Zabudowa balkonu w systemie bezramowym (Zamość).

W zabudowie balkonów można też wykorzystać profile okienne, o większej izolacyjności termicznej niż profile aluminiowe (w połączeniu z zestawami dwu- lub trzy szybowymi) lub elementy drewniane (rys. 2.15, 2.16, 2.17). W tej wersji elementy oszklone otwierane są w sposób tradycyjny, podobnie jak okna – poprzez otwarcie lub uchYLENIE skrzydła. W porównaniu z systemami bezramowymi lub ramowymi rozwiązania te charakteryzują się większym udziałem powierzchni ram w obudowie, ale też i wyższą izolacyjnością cieplną i szczelnością.



**Rys. 2.15.** Oszklone balkony w systemie ramowym przesuwnym – po lewej stronie, i z wykorzystaniem profili okiennych – po prawej stronie (Lublin).



**Rys. 2.16.** Oszklony balkon w systemie bezramowym z uszczelkami pomiędzy szybami (Zamość).



Rys. 2.17. Zabudowa balkonu systemem gospodarczym (Lublin).

### 2.3. Badania eksperymentalne

Pierwsze prace naukowe i popularyzatorskie na temat pasywnego ogrzewania budynków energią słoneczną publikowane były w latach 80. XX wieku w Stanach Zjednoczonych. Do tego nurtu zaliczyć można przede wszystkim opracowania Balcomba, pioniera badań nad domami słonecznymi, powstałe dzięki własnym doświadczeniom i analizom naukowym autora zamieszkującego dom z oszklonym atrium w Sante Fe (tzw. Balcomb House) [8, 18, 19, 126]. Inne monografie z tej dziedziny to m. in. publikacje [127, 303, 310], czy subsydiowane przez instytucje państwowe poradniki promujące ograniczenie zużycia energii ze źródeł nieodnawialnych [49, 103, 125, 227]. W Polsce możliwości wykorzystania energii słonecznej propagowane były na przełomie lat 80. i 90. XX wieku między innymi w pracach [150, 309]. Przedstawiają one szereg praktycznych zaleceń dotyczących konstrukcji szklarni, stosowanych do dziś intuicyjnie przez wielu projektantów. Można je krótko streścić w poniższy sposób.

Szklarnia powinna być zwrócona w stronę południową i oszklona na znacznej powierzchni. Ilość energii przepuszczanej do wnętrza przestrzeni słonecznej zależy od kąta padania promieni słonecznych i jest największa, gdy kąt ten wynosi  $0^\circ$  (tzn. gdy promienie padają prostopadle do powierzchni przeszklenia). Nachylenie oszklwienia wynosi na ogół od  $45^\circ$  do  $65^\circ$  i zależy od wielu czynników, między innymi od klimatu, szerokości geograficznej oraz od ilości ciepła, jaką chcemy pozyskać. Duże kąty nachylenia ( $55^\circ - 65^\circ$ ) są zalecane w chłodnym, słonecznym klimacie, w północnych szerokościach geograficznych, oraz kiedy pożądane jest uzyskanie dużej ilości ciepła. Kąty nachylenia w granicach  $45^\circ - 55^\circ$  są najkorzystniejsze w łagodnym, pochmurnym klimacie oraz kiedy wystarczające są mniejsze zyski

słoneczne. Ze względu na dużą powierzchnię zabudowy i problemy związane ze szczelnością oszklenia nachylonego oraz zaleganiem pokrywy śnieżnej, rozwiązaniem zalecanym przez wielu autorów są oszklenia pionowe, stosowane do ok. 2/3 lub na pełnej wysokości szklarni [127, 147]. Oszklenie pionowe może być mniej wydajne (o ok. 10 - 20% wg [127]), ale wymaga mniejszej powierzchni zabudowy, jest prostsze w wykonaniu, mniej kosztowne, bardziej trwałe i łatwiejsze w użytkowaniu (np. w utrzymaniu czystości). Dodatkową zaletą oszklenia pionowego, szczególnie ważną obecnie, jest mniejsza tendencja do przegrzewania szklarni i przyległych pomieszczeń. W lecie kąty padania promieniowania kierunkowego na płaszczyznę pionową są większe niż na nachyloną. Zyski słoneczne będą więc mniejsze ze względu na zwiększone odbicie promieniowania na zewnątrz. Oszklenie pionowe łatwiej jest też zasłonić niż oszklenie nachylone, co umożliwia bardziej skuteczną kontrolę transmisyjności. Regulacja ilości ciepła pozyskanego w systemach szklarniowych może odbywać się dzięki wentylacji przestrzeni buforowej, należy więc przewidzieć możliwość otwierania oszklenia lub zaprojektować dodatkowe otwory wentylacyjne w obudowie szklarni (rys. 2.18).



**Rys. 2.18.** Szklarnie i wykusze o oszkleniu pionowym i nachylonym, z możliwością wietrzenia poprzez uchylane okna w zadaszaniu (Dania, Aalborg).

Elementem biorącym główny udział w przekazywaniu ciepła do pomieszczeń mieszkalnych jest przegroda między szklarnią a pomieszczeniem ogrzewanym. Materiałami stosowanymi do jej wykonania powinny być materiały o dużej przewodności i pojemności cieplnej, a sama ściana powinna być nieocieplona. Izolacja termiczna znacznie ogranicza efektywność przekazywania energii do pomieszczeń – materiał izolacyjny zastosowany od strony szklarni ogranicza wzrost temperatury w przegrodzie pod wpływem promieniowania słonecznego, a od strony pomieszczeń mieszkalnych utrudnia przekazywanie energii cieplnej. Zalecenia te są słuszne dla klimatu łagodnego [127], jednak w gorszych warunkach



klimatycznych, ze względu na duże straty ciepła w zimie i w ciągu nocy, konieczne jest zaprojektowanie przegrody akumulacyjnej w taki sposób, aby spełniała ona wymagania izolacyjne stawiane przegrodom zewnętrznym [104]. Potwierdzają to także symulacje wykonane dla polskich warunków klimatycznych [141]. W takim systemie rozprowadzanie ciepła można zintensyfikować dzięki wykonaniu w przegrodzie między szklarnią a pomieszczeniem mieszkalnym otworów drzwiowych i okiennych oraz otworów wentylacyjnych, umożliwiających cyrkulację powietrza [160, 192].

Systematyczne badania nad funkcjonowaniem systemów szklarniowych rozpoczęto pod koniec XX. wieku. W latach 1982 - 1988 International Energy Agency (IEA) realizowała Zadanie 8 programu Solar Heating and Cooling (SHC), zatytułowane "Passive and Hybrid Solar Low Energy Buildings" [148]. Celem programu było przyspieszenie stosowania systemów pasywnych w krajach biorących udział w projekcie (były nimi: Austria, Belgia, Dania, Hiszpania, Holandia, Kanada, Niemcy, Norwegia, Nowa Zelandia, Stany Zjednoczone, Szwecja, Szwajcaria, Włochy, Zjednoczone Królestwo). Powstało wówczas 13 budynków modelowych wykorzystujących różne systemy pasywnego ogrzewania słonecznego, monitorowanych w warunkach klimatycznych specyficznych dla każdego kraju. Wśród nich 7 budynków było wyposażonych w systemy zysków pośrednich w postaci szklarni lub atrium. Ich krótką charakterystykę zawarto w tabeli 2.1.

**Tabela 2.1.** *Budynki z systemami zysków pośrednich powstałe podczas realizacji Zadania 8 IEA SHC, wg [148].*

| Lp. | Kraj     | Miasto<br>(szerokość<br>geograficzna) | Średnia<br>temperatura<br>w zimie /<br>w lecie<br>[°C] | Klimat <sup>1</sup>                       | Rodzaj<br>budynku <sup>2</sup> | Prze-<br>strzeń<br>oszkłona | Oszczędność<br>energii<br>w sezonie<br>grzewczym<br>[%] |
|-----|----------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1.  | Austria  | Purkersdorf<br>(48°N)                 | 4,0 / 17,0                                             | kontynentalny<br>z ciepłym<br>latem (Dfb) | bw                             | szklarnia                   | 36                                                      |
| 2.  | Dania    | Smakkebo<br>(55°N)                    | 2,4 / 12,8                                             | oceaniczny<br>(Cfb)                       | bj, zs                         | szklarnia                   | 59                                                      |
| 3.  | Niemcy   | Berlin<br>(52°N)                      | 7,0 / 16,7                                             | kontynentalny<br>z ciepłym<br>latem (Dfb) | bw                             | szklarnia                   | 41                                                      |
| 4.  | Norwegia | Malvik<br>(63°N)                      | 0,3 / 11,3                                             | kontynentalny<br>subarktyczny<br>(Dfc)    | bj                             | szklarnia                   | 13                                                      |
| 5.  | Norwegia | Lørenskog<br>(60°N)                   | -0,3 / 13,4                                            | kontynentalny<br>z ciepłym<br>latem (Dfb) | bj                             | szklarnia                   | 20                                                      |

| Lp. | Kraj       | Miasto<br>(szerokość<br>geogra-<br>ficzna) | Średnia<br>temperatura<br>w zimie /<br>w lecie<br>[°C] | Klimat <sup>1</sup>                       | Rodzaj<br>budynku <sup>2</sup> | Prze-<br>strzeń<br>oszkłona | Oszczędność<br>energii<br>w sezonie<br>grzewczym<br>[%] |
|-----|------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------|
| 6.  | Szwajcaria | Wald<br>(47°N)                             | 5,6 / 12,5                                             | kontynentalny<br>z ciepłym<br>latem (Dfb) | bj, bb                         | szklarnia                   | 25                                                      |
| 7.  | Szwecja    | Sztokholm<br>(59°N)                        | 5,5 / 12,7                                             | kontynentalny<br>z ciepłym<br>latem (Dfb) | bw                             | atrium                      | brak<br>informacji                                      |

<sup>1</sup> klasyfikacja wg [151]

<sup>2</sup> oznaczenia: bb – budynek bliźniaczy, bj – budynek jednorodzinny, bw – budynek wielorodzinny, zs – zabudowa szeregowa.

W większości przypadków szklarnia skierowana była na południe (Norwegia, Lørenskog – na południowy wschód) i oszkłona zestawami podwójnych szyb zwykłych. W trakcie programu rejestrowano warunki zewnętrzne i wewnętrzne w szklarniach oraz pomieszczeniach mieszkalnych, a także zużycie energii na cele grzewcze i ogrzewania ciepłej wody użytkowej. Ocena oszczędności energetycznych w porównaniu z budynkami bez systemów pasywnych dokonywana była głównie na podstawie symulacji komputerowych. Niewiele jest informacji na temat funkcjonowania szklarni w okresie letnim. W badaniach norweskich wskazano, że przegrzewanie pomieszczeń sąsiadujących ze szklarnią nie występowało, natomiast przestrzeń atrium w Sztokholmie wymagała chłodzenia poprzez wzmoczoną wentylację połączoną z przekazywaniem ciepła do zasobnika skalnego pod budynkiem.

Ze względu na znaczne różnice pomiędzy warunkami zewnętrznymi, konstrukcją i wielkością budynków, trudno jest na podstawie wyników badań wyciągnąć szersze wnioski na temat efektywności energetycznej oszklonych przestrzeni. Systemy szklarniowe niewątpliwie przynoszą istotne oszczędności zużycia energii, przy czym ich skuteczność jest największa w zabudowie zwartej – wielorodzinnej lub szeregowej.

Badania te kontynuowano w latach 1989 – 1984 w Zadaniu 13 („Advanced Solar Low Energy Buildings”), którego celem było wypracowanie i sprawdzenie innowacyjnych koncepcji pozwalających na minimalizację zużycia energii w budynkach znacznie bardziej zaawansowanych pod względem ochrony cieplnej oraz pasywnego i aktywnego wykorzystania energii słonecznej [97]. Spośród 16 budynków powstałych podczas realizacji programu, 6 zostało wyposażonych w szklarnie (tabela 2.2).

**Tabela 2.2.** Budynki z systemami zysków pośrednich powstałe podczas realizacji Zadania 13 IEA SHC, wg [97, 289].

| Lp. | Kraj      | Miasto<br>(szerokość<br>geograficzna) | Klimat <sup>1</sup>                    | Rodzaj<br>budynku <sup>2</sup> | Przestrzeń<br>oszkłona | Zużycie<br>energii <sup>3</sup><br>[kWh/m²rok] |
|-----|-----------|---------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------------------------------|
| 1.  | Kanada    | Brampton<br>(43°N)                    | kontynentalny<br>z ciepłym latem (Dfb) | bj                             | szklarnia              | 49 (c)                                         |
| 2.  | Finlandia | Pietarsaari<br>(62°N)                 | kontynentalny<br>subarktyczny (Dfc)    | bj                             | szklarnia              | 12 (o)<br>27 (c)                               |
| 3.  | Niemcy    | Berlin<br>(52°N)                      | kontynentalny<br>z ciepłym latem (Dfb) | bj, bb                         | szklarnia              | 79 (o)<br>125 (c)                              |
| 4.  | Niemcy    | Rottweil<br>(48°N)                    | oceaniczny (Cfb)                       | bj, bb                         | szklarnia              | 31 (o)<br>81 (c)                               |
| 5.  | Holandia  | Amstelveen<br>(52°N)                  | oceaniczny (Cfb)                       | bw                             | szklarnia              | 12 (o)<br>60 (c)                               |
| 6.  | Norwegia  | Hamar<br>(61°N)                       | kontynentalny<br>subarktyczny (Dfc)    | bj, zs                         | szklarnia              | brak danych                                    |

<sup>1</sup> klasyfikacja wg [151]

<sup>2</sup> oznaczenia: bb – budynek bliźniaczy, bj – budynek jednorodzinny, bw – budynek wielorodzinny, zs – zabudowa szeregowa

<sup>3</sup> oznaczenia: o – zużycie energii na ogrzewanie, c – całkowite zużycie energii.

Isolacyjność przegród zewnętrznych budynków była znacznie wyższa niż w Zadaniu 8, i kształtowała się na ogół na poziomie porównywalnym z budynkami pasywnymi (współczynnik przenikania ciepła przegród pełnych wynosił od 0,09 do 0,12 W/(m²·K), okien około 0,7 W/(m²·K). Ze względu na rozbudowane wyposażenie techniczne i instalacyjne (pompy ciepła, wentylacja mechaniczna, aktywne systemy ogrzewania ciepłej wody), ogrzewanie stanowiło stosunkowo małą część całkowitego zużycia energii (od 20% do około 45%). Dzięki ograniczeniu strat ciepła połączonemu z aktywnym i pasywnym wykorzystaniem energii słonecznej, w monitorowanych obiektach zmniejszono zużycie energii o około 60% w porównaniu z budynkami typowymi. Efektywność systemów szklarniowych jako taka nie podlegała ocenie, jednak wyniki badań pokazały że przestrzenie słoneczne są ważnym elementem budownictwa niskoenergetycznego. Warto też zauważyć, że w pracach badawczych z lat 90. podkreślano brak uregulowań prawnych dotyczących projektowania szklarni sąsiadujących z budynkami, utrudniający właściwy dobór rozwiązań na etapie wstępnego projektowania obiektu [72, 300, 301].

Uwarunkowania związane z wprowadzeniem systemów słonecznych do budynków istniejących oraz strategię projektowania służące ich zintegrowaniu z obiektem były przedmiotem badań Zadania 20 IEA, zatytułowanego „Solar renovation concepts and systems”. Wiele uwagi poświęcono tutaj możliwościom wykorzysta-



nia szklarni w celu wstępnego ogrzewania powietrza wentylacyjnego i włączenia przestrzeni słonecznej do istniejących systemów wentylacji budynku [93]. Badania prowadzono w 7 budynkach wielorodzinnych zlokalizowanych w Danii, Holandii, Niemczech, Szwajcarii i Szwecji, poddanych gruntownej termomodernizacji obejmującej m.in. wprowadzenie pasywnych systemów ogrzewania słonecznego w postaci oszklonych balkonów [53]. Budynki wyposażone były w systemy wentylacji wywiewnej, a powietrze pobierane z przestrzeni balkonu stanowiło od 30% do 75% całkowitej wymiany powietrza. Zastosowane rozwiązania przyniosły oszczędności energetyczne rzędu 20% w porównaniu z sytuacją, w której do wentylowania pomieszczeń wykorzystywane byłoby wyłącznie powietrze zewnętrzne. Efektem pobierania powietrza ze strefy balkonów było jednocześnie obniżenie temperatury od 1,5°C do 5°C, ograniczające w pewnym stopniu możliwości ich użytkowania. Podobne problemy zaobserwowano także wykonując symulację przy pomocy obliczeniowej mechaniki płynów (Computational Fluid Dynamics, CFD) oszklonej galerii w budynku zlokalizowanym w północnej Hiszpanii [284]. Kontynuacją Zadania 20 IEA był projekt „SHINE” („Solar Housing Through Innovation For Natural Environment”), obejmujący m.in. renowację dwóch 8. kondygnacyjnych wieżowców w Engelsby, dzielnicy Freiburga (Niemcy), umożliwiającą pasywne i aktywne wykorzystanie energii słonecznej przez mieszkańców dzięki zabudowie balkonów, oszklonej fasadzie i montażowi kolektorów słonecznych [130]. Po przebudowie od marca 1999 do maja 2000 roku w 18 mieszkaniach monitorowano temperaturę w pomieszczeniach sąsiadujących z oszklonymi balkonami. Ze względu na bardzo duże zróżnicowanie zużycia energii nie wyciągnięto jednoznacznych wniosków na temat jego związku z zabudową balkonów. Mimo okresowo występujących wysokich temperatur, w pomieszczeniach generalnie nie stwierdzono problemów z przegrzewaniem.

Oszklone balkony były też przedmiotem dość szerokich badań w Finlandii, mających na celu ocenę ich efektywności w surowym klimacie północnych szerokości geograficznych (od 60°N do 67°N) [100, 101]. Analizy prowadzono w prefabrykowanych budynkach wielorodzinnych ze wspornikowymi lub dostawianymi balkonami, powstałymi od 1966 do 2006 roku. Pomiary obejmowały szczegółową rejestrację temperatury powierzchni przegród i powietrza wewnętrznego w dwóch mieszkaniach i przyległych balkonach, oraz monitoring temperatury powietrza w 22 mieszkaniach z balkonami (w tym 17 z balkonami zabudowanymi) w ciągu 10 miesięcy na przełomie 2009 i 2010 roku. Badania wykazały, że prawie we wszystkich przypadkach temperatura powietrza w przestrzeni zabudowanych i otwartych (ale osłoniętych ścianami bocznymi) balkonów była wyższa niż temperatura powietrza zewnętrznego. Stwierdzono także, że osiągnięte oszczędności energetyczne są w dużej mierze zależne od orientacji i lokalizacji balkonu, a także od szczelności i izolacyjności termicznej obudowy [98].

Wyniki pomniejszych badań eksperymentalnych nad budynkami wyposażonymi w szklarnie można znaleźć w publikacjach [52, 63, 279, 283]. W pracy [195] na podstawie monitoringu temperatury badano możliwość przegrzewania pomieszczeń sąsiadujących z przestrzeniami słonecznymi różnych typów w budynkach mieszkalnych w Hiszpanii. Wyniki świadczą o dużym wpływie świadomych działań użytkowników (takich jak chociażby stosowanie zasłon czy wietrzenie szklarni) na warunki wewnętrzne.

W Polsce prace badawcze nad systemami pasywnymi rozpoczęto, podobnie jak za granicą, pod koniec XX wieku. Na początku lat 80. na terenie ITB wykonany został eksperymentalny budynek jednorodzinny o wysokiej (jak na owe czasy) izolacyjności termicznej przegród, przystosowany do biernego wykorzystania energii słonecznej poprzez system zysków bezpośrednich, wentylowaną przegrodę akumulacyjną i cieplarnię przybudowaną do ściany południowej [159]. W budynku tym monitorowano temperaturę wewnętrzną i zużycie energii do ogrzewania podczas dwóch sezonów grzewczych (1983/84 i 1984/85), co posłużyło do przeprowadzenia porównawczej oceny badanych systemów biernych metodą Solar Load Ratio (SLR). Oceniono, że oszklona przybudówka ma nieco mniejszą efektywność niż system zysków bezpośrednich, jest jednak rozwiązaniem „godnym polecenia”. Autor opracowania podkreślił również fakt, że efektywność biernych systemów zależy w dużym stopniu od lokalnych warunków klimatycznych.

Wolnostojącą szklarnię eksperymentalną wykonano także w ramach badań przedstawionych w [142]. Przegrody szklarni były stosunkowo dobrze izolowane termicznie i szczelne, a w jej wnętrzu umieszczono beczki z wodą, stanowiące magazyn energii słonecznej. W sezonie grzewczym 1986/87 rejestrowano temperatury wewnętrzne szklarni i natężenie promieniowania słonecznego, oraz energię zużywaną na utrzymanie minimalnej temperatury przy pomocy grzejników elektrycznych. Stwierdzono, że dzięki energii promieniowania słonecznego uzyskano wyraźną nadwyżkę temperatury w szklarni nad temperaturą otoczenia, potwierdzając praktyczne możliwości wykorzystania systemów szklarniowych w Polsce.

Badania nad możliwościami zmniejszenia zapotrzebowania na energię w sezonie grzewczym poprzez zabudowę loggii w istniejących budynkach mieszkalnych były tematem pracy doktorskiej [273]. Zaprezentowano tam autorski sposób obliczeń zapotrzebowania na ciepło w pomieszczeniu przystosowanym do pasywnego pozyskiwania energii słonecznej. Pracę oparto na badaniach eksperymentalnych prowadzonych w dwóch istniejących budynkach wielorodzinnych i budynku jednorodzinny, w których zabudowano otwarte loggie i taras. W latach 1987 - 1990 w naturalnych warunkach eksploatacyjnych monitorowano między innymi ilość energii zużytej do ogrzewania pomieszczeń mieszkalnych sąsiadujących z zabudowanymi loggiami oraz ich mikroklimat wewnętrzny. Oszczędności energetyczne będące efektem pasywnego wykorzystania energii słonecznej wyniosły od 22% do 38% w budynku jednorodzinny i od 32% do 53% w budynkach wielorodzinnych

(w zależności od rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych obudowy). Odnotowano także efekt wyrównania temperatury wewnętrznej i zmniejszenia poziomu hałasu wewnątrz pomieszczeń sąsiadujących ze szklarnią, zwiększający komfort ich użytkowania. Prognozowano, że czas zwrotu nakładów poniesionych na termomodernizację i zabudowę loggii nie przekroczy 10 lat. Badania te zaprezentowano także w szerzej dostępnej publikacji [54]. Jak stwierdzili autorzy powyższych prac, wyniki badań „świadczą o celowości zabudowy loggii”, nie tylko ze względów energetycznych, ale i użytkowych. Ponadto oceniono, że zabiegi te są opłacalne ekonomicznie w warunkach polskiego klimatu.

Badania doświadczalne systemów pasywnych prowadzone w skali rzeczywistej, np. w eksperymentalnych budynkach jednorodzinnych, są kosztowne. Wykorzystanie w tym celu istniejących i zamieszkałych obiektów rodzi z kolei problemy związane z ich użytkowaniem, takie jak chociażby utrudnienie dostępu do niektórych pomieszczeń związane z umieszczeniem w nich aparatury pomiarowej czy też konieczność rejestracji zachowań użytkowników mogących mieć wpływ na bilans energetyczny [273]. Z tych względów badania eksperymentalne prowadzi się często w mniejszej skali w komorach badawczych, czyli dokładnie opomiarowanych, wyizolowanych układach wyposażonych w przegrody spełniające funkcje biernych kolektorów słonecznych. W Polsce takie badania prowadzono m.in. na Politechnice Śląskiej i Rzeszowskiej [169, 192, 285], z tym że komora z systemem szklarniowym funkcjonowała tylko na Politechnice Rzeszowskiej. W okresie kilku sezonów grzewczych (od 1993 do 1998 roku) monitorowano tam zużycie energii do celów grzewczych, temperaturę i przepływ ciepła przez przegrody, a także parametry klimatu zewnętrznego. Wyniki pomiarów posłużyły m. in. do ustalenia oszczędności energetycznych jakie zapewniły systemy pośrednie – dla oszklonej przybudówki wyniosły one 34,1% (w porównaniu z pomieszczeniem z izolowaną tradycyjnie ścianą zewnętrzną). W pracy [169] przedstawiono także analizę matematyczną stanów termicznych przegród i strumieni ciepła przepływającego przez elementy komór, oraz wyznaczono zapotrzebowanie na ciepło w przykładowym budynku jednorodzinnym wyposażonym w analizowane systemy.

Opisy podobnych badań zagranicznych zawarto w m. in. publikacjach [27, 70, 188, 197, 218, 219, 266, 272]. Komory badawcze posłużyły do porównawczych analiz różnego rodzaju systemów pasywnych w określonych warunkach klimatycznych [27, 70, 188, 219, 272] lub walidacji indywidualnie opracowanych modeli obliczeniowych i programów komputerowych modelujących wymianę energii w szklarni [197, 218, 266]. W tych ostatnich szczególną uwagę poświęcano odwzorowaniu promieniowania kierunkowego i radiacyjnej wymianie energii między przestrzenią oszkloną a otoczeniem.

## 2.4. Badania analityczne

Obliczenia efektywności energetycznej systemów słonecznych w latach 80. i 90. XX wieku wykorzystywały głównie miesięczną metodę SLR opracowaną przez Balcomba i McFarlanda [18, 20], lub graficzne metody oparte na wykresach pozycji Słońca [185]. Dostępne były też (głównie w Stanach Zjednoczonych) stosunkowo proste programy komputerowe wspomagające projektowanie, najczęściej z miesięcznym krokiem obliczeniowym. Prognozowano wówczas, że głównym motorem rozwoju badań nad systemami pasywnymi będzie tworzenie bardziej złożonych programów komputerowych na potrzeby środowiska inżynierów i naukowców [21].

Przełom XX i XXI wieku to czas intensywnego rozwoju technik obliczeniowych, które znalazły szerokie zastosowanie w modelowaniu przepływów energii w budynkach, a w szczególności - systemów pasywnych. Wielu badaczy wykorzystuje obecnie dostępne komercyjnie oprogramowanie (np. programy DEROB-LTH, TRNSYS, Energy Plus, Esp-r, BSim i inne), umożliwiające dynamiczne modelowanie z krokiem godzinowym. W niewielkim stopniu podejmuje się też próby wykorzystania programów CFD do modelowania przepływu powietrza i temperatury w szklarniach [274, 284].

Jedne z pierwszych badań w tej dziedzinie prowadziła Wall pod koniec XX wieku, prezentując podstawy modelowania matematycznego szklarni oraz oceniając wyniki uzyskane przy pomocy wybranych programów komputerowych w pracach [300, 301, 302]. Autorka zwróciła uwagę na fakt, że w pomieszczeniach o dużej powierzchni oszklenia znaczna część przepuszczonego promieniowania słonecznego (od około 20% do 50% w zimie i od około 30% do 70% w lecie) może być odbita wstecz od powierzchni wewnętrznych i przekazana z powrotem na zewnątrz [302]. Nie mogą więc znaleźć tu zastosowania narzędzia i metody wykorzystywane w ocenie energetycznej typowych pomieszczeń mieszkalnych o stosunkowo małej powierzchni przegród oszklonych, gdzie przyjmuje się założenie, że promieniowanie słoneczne rozproszone we wnętrzu na drodze kolejnych odbić zostanie pochłonięte w całości przez obudowę pomieszczenia [51, 166, 213, 298]. Ocenę zysków słonecznych w szklarni należy przeprowadzić z uwzględnieniem jej geometrii i rzeczywistej drogi promieniowania kierunkowego. Ważnym składnikiem bilansu energetycznego powinna być też wymiana radiacyjna między oszkleniem a nieboskłonem w zakresie promieniowania długofalowego [300, 301, 302]. Badania analityczne zostały zweryfikowane dzięki pomiarom temperatur w kilku budynkach mieszkalnych wyposażonych w oszkloną przestrzeń zlokalizowanych w różnych miastach Szwecji [72]. Autorka posługiwała się zarówno prostym bilansem energetycznym szklarni w założeniu ustalonego stanu wymiany ciepła, jak i dynamicznymi symulacjami komputerowymi, pozwalającymi na bardziej dokładną analizę rozkładu promieniowania we wnętrzu szklarni lub atrium

[300, 301]. Porównawcze oceny różnych typów przestrzeni słonecznych pozwoliły na wysunięcie wniosków, że największy wpływ na zdolność konwersji promieniowania mają: absorpcyjność promieniowania krótkofalowego na powierzchni obudowy, geometria szklarni i powierzchnia oszklenia, liczba szyb (w pracach wzięto pod uwagę tylko szyby zwykłe) i orientacja względem stron świata.

Tradycja stosowania oszklonych przybudówek jest bardzo rozpowszechniona w klimacie śródziemnomorskim, gdzie rozwiązania te dają największe zyski energetyczne. Od początku XXI wieku podejmuje się tam próby analitycznej oceny ich efektywności energetycznej. Programy symulacyjne posłużyły różnym autorom do dość szerokich badań porównawczych funkcjonowania systemów szklarniowych w krajach takich jak Hiszpania, Portugalia, Włochy, Grecja czy Jordania, zaprezentowanych w opisanych poniżej publikacjach [9, 22, 51, 190, 191, 214, 215, 216, 284].

W pracach [190, 191] budynek złożony z pojedynczej strefy termicznej sąsiadującej ze szklarnią zamodelowano w programie TRNSYS. Symulacje pozwoliły m. in. na ustalenie temperatur wewnętrznych części mieszkalnej i szklarni w sezonie zimowym i letnim przy założeniu swobodnej reakcji budynku na zmiany temperatury zewnętrznej i nasłonecznienia (brak ogrzewania i chłodzenia – „free running”). Zastosowanie szklarni zwiększyło temperaturę strefy mieszkalnej od 1,5°C do 5°C zarówno w okresie zimowym jak i letnim. Wyniki te świadczą o możliwości zmniejszenia zapotrzebowania na ciepło w sezonie grzewczym, i niestety, o ryzyku przegrzewania pomieszczeń w ciągu lata. Połączone zastosowanie gruntowego wymiennika ciepła schładzającego powietrze w szklarni, nocnego wietrzenia i zacinienia ograniczyło temperaturę wewnętrzną do około 27°C, co oceniono jako wystarczające zabezpieczenie pomieszczeń sąsiednich przed dyskomfortem termicznym.

W publikacjach [22, 214, 215, 216] ocenie poddano różne typy obudowy przestrzeni słonecznej o zmiennych proporcjach powierzchni oszklonych i pełnych, wykorzystując do obliczeń program DEROB-LTH. Jako miarę skuteczności pozyskiwania energii słonecznej przyjęto efektywny współczynnik absorpcji promieniowania, wyznaczany jako stosunek promieniowania pochłoniętego na wewnętrznych powierzchniach nieprzezroczystej części obudowy szklarni i promieniowania przepuszczonego przez część oszkloną. Wg autorów, największy wpływ na efektywności szklarni ma jej geometria, właściwości optyczne obudowy i orientacja względem stron świata. Metodykę badań oparto na analizach systemów zysków bezpośrednich przedstawionych m. in. w pracy [51], i ze względu na nieco inny charakter funkcjonowania systemów zysków pośrednich ma ona pewne ograniczenia. Przede wszystkim, w systemach szklarniowych nie cała ilość energii pochłoniętej przez obudowę szklarni przekłada się na zyski energetyczne w przyległych pomieszczeniach mieszkalnych, jak to ma miejsce w przypadku zysków bezpośrednich. Część energii jest tracona na drodze wymiany powietrza między szklarnią a otoczeniem, a część poprzez transmisję ciepła przez obudowę



szklarni do środowiska zewnętrznego. Zjawiska te mają szczególne znaczenie, jeżeli przegroda pomiędzy szklarnią a ogrzewaną strefą mieszkalną jest izolowana termicznie.

Potencjalne możliwości zmniejszenia zapotrzebowania na energię związane z zastosowaniem szklarni w krajach obszaru Morza Śródziemnego orientacyjnie oceniane są przez autorów powyższych publikacji w przedziale od 15% [284] do 100% [3]. Tak szeroki zakres wyników jest skutkiem m. in.:

- różnego położenia analizowanych obiektów (szerokości geograficzne od 32°N do 45°N),
- zróżnicowania modelowanych budynków lub pomieszczeń pod względem funkcji, wielkości czy charakterystyk termicznych przegród,
- zmiennych założeń dotyczących wyznaczania zysków energetycznych (np. w publikacjach [214, 215, 216] dość restrykcyjnie szacuje się efekty związane z wykorzystaniem szklarni do wstępnego ogrzewania powietrza zewnętrznego, zakładając że zyski te są uwzględniane jeżeli temperatura powietrza w szklarni jest wyższa niż +20°C; ponadto niektóre publikacje odnoszą się do efektów wyznaczanych dla całego budynku, a inne – dla pomieszczeń przylegających do szklarni).

Podobne analizy przeprowadzone na przykładzie wielorodzinnego budynku mieszkalnego zlokalizowanego w Serbii (Belgrad) wykazały oszczędności energii w sezonie grzewczym na poziomie 2% i 11% (odpowiednio dla całego budynku i mieszkań bezpośrednio sąsiadujących ze szklarnią) [112].

Systemy szklarniowe cieszą się dużym zainteresowaniem także w krajach nordyckich (rys. 2.19, 2.20). Ze względu na surowy klimat szczególnie ceni się tam możliwość kontaktu z naturą w warunkach bardziej korzystnych dla człowieka niż te panujące na zewnątrz, a oszklone przybudówki czy atria postrzegane są jako swoisty łącznik między środowiskiem wewnętrznym a otoczeniem budynku [301].



Rys. 2.19. Oszklona przestrzeń w budynku użyteczności publicznej (Dania, Aalborg).



W budynkach wielorodzinnych taką funkcję mogą pełnić oszklone balkony, a o ich popularności świadczy chociażby fakt, że np. wg [100] 70% balkonów w Finlandii jest zabudowanych. W krajach północnych o zimnym i słonecznym klimacie przestrzenie słoneczne mogą zapewnić znaczące oszczędności energii, mimo że ich procentowy wkład w zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło jest znacznie mniejszy niż w krajach południowych [254]. Analizując różne czynniki wpływające na modyfikację zapotrzebowania na ciepło w przykładowym budynku wielorodzinnym z oszklonymi balkonami, autorzy pracy [100] wykazali, że w północnych szerokościach geograficznych (od 60°N do 67°N) dzięki systemom szklarniowym można zmniejszyć potrzeby energetyczne mieszkań od 11% do 15%. Według przedstawionych przez nich badań, największe znaczenie dla efektywności układu ma zintegrowanie oszklonej przestrzeni z systemem wentylacji budynku, izolacyjność termiczna, właściwości optyczne i szczelność obudowy balkonów.



**Rys. 2.20.** Zabudowane balkony w budynku wielorodzinnym (Finlandia, Lappeenranta).

Zabudowa balkonów była częścią prac termomodernizacyjnych przeprowadzonych w budynkach wielorodzinnych powstałych od 1900 do 1966, znajdujących się w Danii i Niemczech [129]. Analizy symulacyjne modernizowanych obiektów również wykazały realne oszczędności energii w sezonie grzewczym (od 50% do 60%), pod warunkiem właściwego doboru obudowy balkonów i sposobu ich użytkowania, co potwierdzają także publikacje [4, 94, 95]. Na celowość stosowania systemów szklarniowych w budynkach o niskiej izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych wskazuje także praca [37].

W Polsce systematycznych analiz obliczeniowych związanych z problematyką systemów szklarniowych jest stosunkowo niewiele. Badania symulacyjne dotyczące potencjału energetycznego zabudowy balkonów w polskich warunkach klimatycznych prowadziła autorka w ramach wstępnych analiz związanych z niniejszą publikacją. Wyniki prezentowane były w artykułach [86, 87, 88], i wskazywały na

możliwość ograniczenia zużycia energii w przykładowym mieszkaniu od 9% do 29% (w zależności od rodzaju obudowy balkonu i lokalizacji na terenie Polski). Tematyką systemów szklarniowych zajmowali się również autorzy prac [141, 210], przedstawiających wyniki symulacji w programach Energy Plus i Design Builder. Wskazywały one na możliwość osiągnięcia kilkudziesięcioprocentowych oszczędności energetycznych dzięki szklarni w budynku jednorodinnym [141], oraz na zagrożenie przegrzewaniem w wielorodzinnych budynkach prefabrykowanych z zabudowanymi balkonami [210].

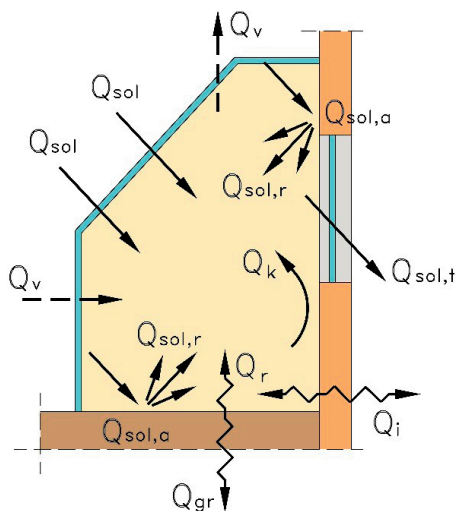
Podsumowując, systemy szklarniowe są przedmiotem wielu prac badawczych, zarówno doświadczalnych jak i obliczeniowych, potwierdzających celowość ich stosowania w różnych warunkach klimatycznych. Najdłuższe tradycje i największy potencjał wykorzystania systemów szklarniowych istnieją w klimacie śródziemnomorskim, ale rozwiązanie te są efektywne pod względem energetycznym także w klimatach o mniej korzystnych warunkach nasłonecznienia [99, 100, 254, 259]. Jak wynika z omówionych powyżej badań, czynniki mające istotny wpływ na zyski energetyczne to powierzchnia oszklenia, zdolność pochłaniania promieniowania przez nieprzezroczystą obudowę szklarni, izolacyjność termiczna obudowy szklarni, zintegrowanie przestrzeni słonecznej z budynkiem i jego systemem wentylacyjnym.

Mimo wieloletnich analiz pewne zagadnienia nie są jeszcze dokładnie rozpoznane, jak chociażby wpływ powłok spektralnie selektywnych na bilans energetyczny szklarni i przyległych pomieszczeń czy ocena całorocznego funkcjonowania systemu szklarniowego pod kątem zapewnienia jak największych zysków słonecznych w sezonie grzewczym i ograniczenia przegrzewania w sezonie chłodniczym. Odnotowywane od początku XXI wieku zmiany klimatyczne sprawiają, że konieczna jest również redefinicja potencjalnych korzyści i zagrożeń jakie mogą wiązać się z tymi systemami pasywnymi, ze szczególnym zwróceniem uwagi na możliwości regulowania klimatu wewnętrznego w okresie letnim przy pomocy odpowiednich rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych obudowy kolektora szklarniowego.

### 3. Metody obliczeniowe wyznaczania zysków energetycznych pochodzących od systemów szklarniowych

Zjawiska fizyczne zachodzące podczas wymiany energii między przeszkloną przestrzenią a otoczeniem przedstawiono schematycznie na rys. 3.1. Promieniowanie słoneczne przepuszczone do wnętrza szklarni  $Q_{sol}$  może zostać:

- transmitowane do przyległych pomieszczeń przez przezroczyste elementy w ścianie między szklarnią a budynkiem ( $Q_{sol,t}$ ),
- pochłonięte na powierzchni obudowy ( $Q_{sol,a}$ ),
- odbite od wewnętrznych powierzchni przegród lub wyposażenia ( $Q_{sol,r}$ ).



**Rys. 3.1.** Schemat wymiany ciepła w szklarni:  $Q_{sol}$  – promieniowanie słoneczne przepuszczone przez obudowę szklarni [J],  $Q_{sol,t}$  – promieniowanie słoneczne transmitowane do pomieszczenia mieszkalnego przez oszklenie w ścianie oddzielającej [J],  $Q_{sol,a}$  – promieniowanie słoneczne absorbowane na powierzchni przegród pełnych wewnątrz szklarni [J],  $Q_{sol,r}$  – promieniowanie słoneczne odbite od powierzchni przegród wewnątrz szklarni [J],  $Q_{gr}$  – ciepło przekazane do gruntu [J],  $Q_i$  – ciepło przekazane przez przegrody pełne do pomieszczenia przyległego [J],  $Q_k$  – ciepło przekazane do powietrza w szklarni przez konwekcję [J],  $Q_r$  – ciepło oddawane z powierzchni przez promieniowanie [J],  $Q_v$  – wymiana ciepła przez wentylację szklarni [J]. Opracowano na podstawie [197, 214, 215, 225].

Promieniowanie transmitowane przez oszklenie zachowuje swój charakter przestrzenny (tzn. ma postać kierunkową lub rozproszoną), natomiast wiązka odbita od chropowatej powierzchni obudowy ulega rozproszeniu wewnątrz szklarni [166, 197, 214, 215, 216] i może być wtórnie pochłonięta na powierzchniach lub tracona na zewnątrz na skutek wstecznego odbicia. Promieniowanie pochłonięte na powierzchni obudowy powoduje wzrost jej temperatury, a następnie może zostać przekazane do powietrza w szklarni na drodze konwekcji ( $Q_k$ ), wypromieniowane do obudowy zewnętrznej o niższej temperaturze ( $Q_r$ ) lub przekazane do gruntu ( $Q_{gr}$ ) albo pomieszczeń przyległych poprzez ścianę oddzielającą między szklarnią a strefą mieszkalną ( $Q_i$ ). Wymiana ciepła między otoczeniem a szklarnią może odbywać się także poprzez przepływ powietrza spowodowany naturalnym działaniem wiatru i różnicą ciśnień lub wymuszony działaniem wentylacji mechanicznej ( $Q_v$ ).

Wymianę ciepła w szklarni można opisać ogólnymi równaniami (przy założeniu, że pojemność cieplna powietrza zamkniętego w objętości szklarni jest pomijalnie mała) [214, 215]:

$$Q_{sol} = Q_{sol,a} + Q_{sol,t} + Q_{sol,r}, \quad (3.1)$$

$$Q_{sol,a} - Q_k - Q_r - Q_i - Q_{gr} = \Delta E_o, \quad (3.2)$$

gdzie:

$\Delta E_o$  – zmiana energii wewnętrznej obudowy szklarni [J].

Uwzględnienie zysków energii generowanych przez szklarnię w bilansie energetycznym budynku wymaga metodyki spójnej z obliczeniami zapotrzebowania na ciepło, o takim stopniu złożoności, który pozwoli na właściwe odwzorowanie parametrów kluczowych dla funkcjonowania systemu pasywnego przy jednoczesnym utrzymaniu nakładu pracy niezbędnego do wykonania obliczeń na racjonalnym poziomie.

Poniżej przedstawiono sposoby modelowania systemów szklarniowych wykorzystywane do wyznaczania zapotrzebowania na energię z krokiem miesięcznym lub godzinowym. Pominięto metody roczne jako zbyt mało dokładne wobec aktualnych tendencji do projektowania obiektów o wysokim stopniu wykorzystania odnawialnych źródeł energii i ochrony cieplnej.

### 3.1. Metoda Solar Load Ratio (SLR)

Metoda ta opracowana została w Los Alamos National Laboratory przez Balcomba i współpracowników [20], i cieszyła się dużą popularnością w latach 80. i 90. XX wieku (przede wszystkim w Stanach Zjednoczonych [125, 227, 310]).

Obecnie także jest przywoływana i wykorzystywana w publikacjach naukowych związanych z tematyką systemów pasywnych [212, 259]. Sposób obliczeń nawiązywał do uproszczonej metody stopniodni, zaliczanej do metod stanu ustalonego (stacjonarnych) opartych na założeniu stałego w czasie przepływu ciepła w przegrodach budowlanych [312].

Solar Load Ratio (SLR) definiowany jest jako stosunek miesięcznych zysków słonecznych i obciążeń cieplnych, przy czym wielkości te są różnie określane dla różnych systemów pasywnych. Głównym założeniem metody jest związek między oszczędnościami energetycznymi pochodzącymi od systemów pasywnych SSF (Solar Savings Fraction) a wielkością SLR. Korelacje pomiędzy SSF i SLR zostały wyznaczone przy pomocy symulacji komputerowych dla 94 budynków referencyjnych wyposażonych w systemy zysków bezpośrednich, szklarnie lub ściany kolektorowo-akumulacyjne. Budynki te zlokalizowano w 6 miejscowościach na terenie Stanów Zjednoczonych, reprezentujących zróżnicowane warunki klimatyczne. W procesie projektowania można było wykorzystywać dane dla obiektów referencyjnych lub posługiwać się wykresami SSF pozwalającymi na bardziej elastyczną zmianę wybranych parametrów systemu.

Autorzy metody oceniają, że błędy wynikające z przyjętych korelacji w skali roku nie powinny przekraczać 3% (w porównaniu z symulacjami z krokiem godzinowym), chociaż dla poszczególnych miesięcy mogą sięgać 8%. Modele symulacyjne walidowano na podstawie pomiarów przeprowadzonych w budynkach eksperymentalnych. W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną jedynie zasady przeprowadzania obliczeń dla budynków z systemami szklarniowymi. Jeżeli budynek wyposażony był w kilka różnych systemów pasywnych, zyski energetyczne należało wyznaczać dla każdego z nich, dzieląc budynek na strefy z przyporządkowanymi pojedynczymi systemami. Oznaczenia, wzory i jednostki przyjęto za oryginalnym opracowaniem [20].

Geometria budynku, izolacyjność przegród zewnętrznych oraz intensywność wentylacyjnej wymiany powietrza ujęte były we współczynniku strat ciepła oznaczanym jako Net Load Coefficient (NLC). Nie uwzględniał on mostków termicznych ani strat ciepła przez przegrodę pomiędzy budynkiem a przestrzenią szklarni:

$$NLC = 24 \cdot \left( \sum_n UA_n + UA_i \right) \text{ [Btu/(}^\circ\text{F} \cdot \text{dzień)]}, \quad (3.3)$$

gdzie:

$n$  – liczba przegród oddających ciepło (stykających się ze środowiskiem o temperaturze niższej niż wewnętrzna),

$UA$  – współczynnik strat ciepła dla przegrody oddającej ciepło (iloczyn współczynnika przenikania ciepła i powierzchni przegrody) [Btu/( $^\circ\text{F} \cdot \text{h}$ )],

$UA_i$  – współczynnik strat ciepła przez infiltrację (zależny od krotności wymian powietrza) [Btu/( $^\circ\text{F} \cdot \text{h}$ )].

Wielkość NLC odniesiona do powierzchni oszklenia szklarni zrzuwanej na płaszczyznę pionową  $A_p$  definiowana była jako Load Collector Ratio (LCR):

$$LCR = \frac{NLC}{A_p} \text{ [Btu/(°F·dzień·ft}^2\text{)]}. \quad (3.4)$$

Analogicznie wyznaczano współczynnik strat ciepła przez przegrody zewnętrzne i infiltrację w szklarni:

$$LCR_s = \frac{NLC_s}{A_p} \text{ [Btu/(°F·dzień·ft}^2\text{)]}. \quad (3.5)$$

Wielkości LCR i  $LCR_s$  reprezentowały straty ciepła w odniesieniu do potencjalnych zysków energetycznych i miały decydujący wpływ na efektywność systemu pasywnego. Całkowity współczynnik strat ciepła przez obudowę Total Load Coefficient (TLC) obliczano jako:

$$TLC = NLC + \left( \frac{UA_{cw} \cdot NCL_s}{UA_{cw} + NCL_s / 24} \right) \text{ [Btu/(°F·dzień)]}, \quad (3.6)$$

gdzie:

$UA_{cw}$  – współczynnik strat ciepła dla ściany między szklarnią a budynkiem (iloczyn współczynnika przenikania ciepła i powierzchni ściany) [Btu/(°F·h)].

Funkcjonowanie budynku w określonych warunkach klimatycznych wyrażał współczynnik SLR dany wzorem:

$$SLR = \left( \frac{S}{DD} - LCR_s \cdot H \right) / LCR, \quad (3.7)$$

gdzie:

$S$  – zyski słoneczne pochodzące ze szklarni [Btu/ft<sup>2</sup>],

$DD$  – liczba stopniodni ponad określoną temperaturę bazową [°F·dzień],

$H$  – bezwymiarowy parametr korelacyjny ustalany na podstawie danych dla budynku referencyjnego najbliższego budynkowi projektowanemu [-].

Temperatura bazowa okresu ogrzewania  $T_b$  przyjmowana była jako:

$$T_b = T_{set} - Q_{int} / TLC \text{ [°F]}, \quad (3.8)$$

gdzie:

$T_{set}$  – nastawa okresu ogrzewania [°F],

$Q_{int}$  – dzienne zyski ciepła pochodzące od urządzeń gospodarstwa domowego, oświetlenia i ludzi [Btu/dzień].



Zyski słoneczne dla danego miesiąca wyznaczano w następujący sposób:

$$S = M \cdot \frac{A_n}{A_p} \cdot HS \cdot \left( \frac{INC}{HOR} \right) \cdot \left( \frac{TRN}{INC} \right) \cdot \left( \frac{ABS}{TRN} \right) [\text{Btu/ft}^2], \quad (3.9)$$

gdzie:

M – liczba dni w miesiącu,

$A_n$  – powierzchnia netto oszklenia szklarni [ $\text{ft}^2$ ],

$A_p$  – powierzchnia oszklenia szklarni rzutowana na płaszczyznę pionową równoległą do oszklenia głównego (najczęściej było to oszklenie o największej powierzchni skierowane na południe) [ $\text{ft}^2$ ],

HS – średnie dzienne natężenie promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą [ $\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{dzień})$ ],

$\left( \frac{INC}{HOR} \right)$  – stosunek miesięcznego natężenia promieniowania padającego na jednostkową powierzchnię oszklenia do natężenia na jednostkową powierzchnię poziomą [-],

$\left( \frac{TRN}{INC} \right)$  – stosunek miesięcznego natężenia promieniowania przepuszczonego przez oszklenie do natężenia promieniowania padającego na jego zewnętrzną powierzchnię [-],

$\left( \frac{ABS}{TRN} \right)$  – stosunek miesięcznego natężenia promieniowania pochłoniętego przez obudowę budynku do promieniowania przepuszczonego przez oszklenie [-].

Wielkości (INC/HOR) i (TRN/INC) skorelowane zostały ze średnim miesięcznym współczynnikiem przejrzystości atmosfery  $k_T$  i kątem wzniesienia słońca w południe astronomiczne, ustalonym dla środkowego dnia miesiąca. Parametr (ABS/TRN) był stabelaryzowany dla ponad tysiąca wariantów geometrii szklarni i absorpcyjności jej powierzchni wewnętrznych.

Współczynnik SSF wyrażał proporcję oszczędności energetycznych uzyskanych dzięki systemowi pasywnemu  $Q_{sav}$  i zapotrzebowania na ciepło w budynku tradycyjnym  $Q_{net}$ :

$$SSF = \frac{Q_{sav}}{Q_{net}} [-]. \quad (3.10)$$

Zgodnie z założeniami metody, był on funkcją współczynnika SLR i mógł być określany jako:

$$SSF = 1 - C \cdot \exp\left(-\frac{D}{SLR}\right), \quad (3.11)$$

gdzie:

C, D – współczynniki korelacyjne ustalane na podstawie danych dla budynku referencyjnego najbliższego budynkowi projektowanemu [-].

Zapotrzebowanie na ciepło w sezonie grzewczym budynku w wersji podstawowej  $Q_{net}$  i po wprowadzeniu systemu pasywnego  $Q_{aux}$  wyznaczano korzystając z poniższych zależności:

$$Q_{net} = NLC \cdot DD \text{ [Btu]}, \quad (3.12)$$

$$Q_{sav} = Q_{net} \cdot SSF \text{ [Btu]}, \quad (3.13)$$

$$Q_{aux} = Q_{net} \cdot (1 - SSF) \text{ [Btu]}. \quad (3.14)$$

W celu ułatwienia obliczeń, dane klimatyczne takie jak sumy miesięczne natężenia promieniowania na płaszczyznę poziomą, współczynniki przejrzystości atmosfery czy ilości stopniodni, zostały zebrane w ujednoliconej formie dla ponad dwustu miast w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie.

Dzięki stabelaryzowanym wielkościom pomocniczym metoda SLR była stosunkowo prostym narzędziem obliczeniowym, pozwalającym na ocenę efektów zastosowania systemów pasywnych w sposób zgodny z powszechnie wówczas stosowaną metodą stopniodni. Wykresy współczynników SSF prezentujące ich zależność od podstawowych parametrów projektowych (takich jak chociażby liczba szyb, geometria szklarni, absorpcyjność obudowy, intensywność wentylacji) umożliwiały ponadto wybór najbardziej korzystnej konfiguracji systemu już na etapie wstępnego projektowania. Należy także docenić wkład pracy włożony w przygotowanie tak obszernych, spójnych i praktycznych pomocy projektowych.

Niedostatki tej metody wynikają przede wszystkim z faktu, że w procesie projektowania opierano się na korelacjach wyznaczonych dla określonych budynków referencyjnych. Dokładność obliczeń była więc tym większa, im bardziej obiekt zbliżony był do wersji odniesienia. Ponadto metoda nie oszacowywała w pełni efektu buforowego szklarni i zysków słonecznych pochodzących od rozproszonego promieniowania słonecznego, co skutkowało zaniżoną oceną efektywności systemów pasywnych w chłodnych i pochmurnych klimatach [73, 75].

### 3.2. Metoda 5000

Metoda 5000 powstała we Francji w 1982 roku w ramach programu „5000 Maisons Solaires” [9]. Według Metody 5000 straty ciepła przez przegrody zewnętrzne pomieszczeń ogrzewanych wyznaczane były z uwzględnieniem liczby stopniodni w danym miesiącu. Zyski słoneczne pochodzące ze szklarni  $\Phi$  obliczano jako sumę czterech składowych [48, 226]:

- promieniowania docierającego do pomieszczenia mieszkalnego bezpośrednio przez oszkloną obudowę szklarni i oszklenia w ścianie oddzielającej  $\Phi_{sdg}$ ,
- promieniowania pochłanianego na powierzchni obudowy szklarni i ściany oddzielającej i powodującego wzrost temperatury  $\Phi_{smv}$ ,
- efektu buforowego zwiększającego temperaturę powietrza w szklarni  $\Phi_{sb}$ ,
- zmniejszenia strat ciepła poprzez wstępne ogrzanie powietrza wentylacyjnego  $\Phi_{sa}$ .

Poniżej przedstawiono zasady ich wyznaczania, przyjmując oryginalne oznaczenia wielkości fizycznych wg [48].

$$\Phi_{sdg} = A \cdot m \cdot \tau \cdot m_s \cdot \tau_s \cdot E_i \cdot S_f \text{ [kWh/dzień]}, \quad (3.15)$$

gdzie:

$A$  – powierzchnia okna w ścianie oddzielającej [ $m^2$ ],

$m$  – udział oszklenia w powierzchni okna [-],

$\tau$  – transmisyjność oszklenia okna w ścianie oddzielającej [-],

$m_s$  – udział oszklenia w powierzchni obudowy szklarni [-],

$\tau_s$  – transmisyjność oszklenia obudowy szklarni [-],

$E_i$  – natężenie promieniowania słonecznego padającego na obudowę szklarni [ $kWh/(m^2 \cdot \text{dzień})$ ],

$S_f$  – współczynnik uwzględniający zacienianie [-].

$$\Phi_{smv} = 0,11 \cdot U \cdot \alpha \cdot m_s \cdot \tau_s \cdot A \cdot E_i \cdot S_f \text{ [kWh/dzień]}, \quad (3.16)$$

gdzie:

$U$  – współczynnik przenikania ciepła ściany oddzielającej [ $W/(m^2 \cdot K)$ ],

$\alpha$  – absorpcyjność powierzchni ściany oddzielającej zwróconej w stronę szklarni [-].

$$\Phi_{sb} = L_{hm} \cdot (T_s - T_{sng}) \cdot 0,024 \text{ [kWh/dzień]}, \quad (3.17)$$

gdzie:

$L_{hm}$  – współczynnik przenoszenia ciepła przez przegrodę oddzielającą między pomieszczeniem mieszkalnym a szklarnią [ $W/K$ ],

$\theta_s$  – temperatura powietrza w szklarni [ $^{\circ}C$ ]

$$\theta_s = \frac{L_{hm} \cdot \theta_{int,H} + L_{bm} \cdot \theta_e}{L_{hm} + L_{bm}} + \frac{F_s / 0,024}{L_{hm} + L_{bm}}, \quad (3.18)$$

$\theta_{\text{int,H}}$  – nastawa temperatury w pomieszczeniu mieszkalnym [°C],  
 $\theta_e$  – średnia temperatura powietrza zewnętrznego [°C],  
 $L_{\text{bm}}$  – współczynnik przenoszenia ciepła między szklarnią a środowiskiem zewnętrznym [W/K],  
 $F_s$  – część promieniowania przedostająca się do wnętrza szklarni wpływająca na wzrost temperatury [-]

$$F_s = (a_1 \cdot E_s) - (a_2 \cdot \Phi_{\text{sdg}}) - \Phi_{\text{smv}}, \quad (3.19)$$

$a_1, a_2$  – współczynniki uwzględniające straty promieniowania słonecznego na zewnątrz, zależne od geometrii szklarni i właściwości termicznych i optycznych jej obudowy [-],

$\theta_{\text{sng}}$  – temperatura powietrza w szklarni przy braku zysków słonecznych [°C]

$$T_{\text{sng}} = \frac{L_{\text{hm}} \cdot T_i + L_{\text{bm}} \cdot T_e}{L_{\text{hm}} + L_{\text{bm}}}. \quad (3.20)$$

$$\Phi_{\text{sa}} = m \cdot c_p \cdot (T_s - T_{\text{sng}}) \cdot 0,024, \quad (3.21)$$

gdzie:

$m$  – strumień powietrza ogrzewanego w szklarni [kg/s],

$c_p$  – ciepło właściwe powietrza [J/(kg·K)].

Całkowite zyski ciepła pochodzące od szklarni  $\Phi$  wynoszą:

$$\Phi = \Phi_{\text{sdg}} + \Phi_{\text{smv}} + \Phi_{\text{sb}} + \Phi_{\text{sa}}. \quad (3.22)$$

Są one sumowane z zyskami z pozostałych systemów pasywnych występujących w budynku (np. zyskami bezpośrednimi pochodzącymi od okien) i zyskami bytowymi. W bilansie energetycznym dla każdego miesiąca zyski ciepła mnożone są przez bezwymiarowy współczynnik wykorzystania  $\eta$ , zależny od masy obudowy i ustalany na podstawie wykresów prezentowanych m.in. w [289].

### 3.3. Metody ISO 13790

Implementacja Dyrektywy Parlamentu Europejskiego nr 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków zaleciła wprowadzenie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynków zgodnej ze wspólnymi ramami ogólnymi [62]. W ramach tych działań Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN) przyjął w 2008 roku normę ISO 13790 „Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia” [241]. Przedstawiana w niej metoda obliczeń, wykorzystująca bezwymiarowy czynnik

wykorzystania zysków ciepła, powstała w trakcie realizacji projektu badawczego PASSYS [30]. Jego celem było opracowanie sposobu wyznaczania zapotrzebowania na energię dającego możliwość uwzględnienia w bilansie energetycznym pasywnych systemów słonecznych.

Norma [241] zawiera trzy rodzaje metod wyznaczania zapotrzebowania na ciepło:

- metody stanu quasi-ustalonego,
- prostą godzinową metodę dynamiczną,
- procedury obliczania dla szczegółowych metod symulacyjnych.

Metody quasi-stacjonarne oparte są na założeniu ustalonego przepływu ciepła w przegrodach budowlanych. Zjawiska związane z dynamicznym zachowaniem budynku, takie jak akumulacja i uwalnianie ciepła, są uwzględniane pośrednio poprzez współczynnik wykorzystania zysków ciepła. Obliczenia przeprowadza się dla dość długich okresów czasu (np. jeden miesiąc lub cały sezon grzewczy), uśredniając parametry klimatyczne takie jak temperatura zewnętrzna i natężenie promieniowania słonecznego. W metodach tych zakłada się, że nie wszystkie zyski ciepła (bytowe lub słoneczne) są faktycznie wykorzystane do zmniejszenia zapotrzebowania na energię. Część zysków powoduje niepożądany wzrost temperatury wewnętrznej ponad wartość nastawy, i nie są one uwzględniane w równaniach bilansu energetycznego. Pomija się również zwiększone przenoszenie ciepła przez przenikanie i wentylację (będące skutkiem podwyższonej chwilowo temperatury), co „równoważy” pominięcie niewykorzystanej części zysków. Współczynnik wykorzystania zysków ciepła jest ustalany na podstawie empirycznych zależności, jako funkcja stosunku zysków do strat ciepła i stałej czasowej budynku.

Podstawowe równania miesięcznej metody quasi-stacjonarnej są następujące [241]:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn}, \quad (3.23)$$

gdzie:

$Q_{H,nd}$  – zapotrzebowanie na energię do ogrzewania w ciągu kroku czasowego [MJ],

$Q_{H,ht}$  – całkowite przenoszenie ciepła, uwzględniające straty ciepła przez obudowę budynku lub pomieszczeń  $Q_{tr}$  i straty ciepła na ogrzanie powietrza wentylacyjnego  $Q_{ve}$  [MJ]

$$Q_{H,ht} = Q_{tr} + Q_{ve} \text{ [MJ]}, \quad (3.24)$$

$Q_{H,gn}$  – całkowite zyski ciepła, uwzględniające zyski bytowe  $Q_{int}$  i pochodzące od promieniowania słonecznego  $Q_{sol}$  [MJ]

$$Q_{H,gn} = Q_{int} + Q_{sol}, \quad (3.25)$$

$\eta_{H,gn}$  – bezwymiarowy czynnik wykorzystania zysków ciepła, zależny od proporcji zysków i strat ciepła oraz od pojemności cieplnej budynku [-]

$$\eta_{H,gn} = \frac{1 - \gamma_H^{aH}}{1 - \gamma_H^{aH+1}} \text{ dla } \gamma_H > 0 \text{ oraz } \gamma_H \neq 1, \quad (3.26)$$

$$\eta_{H,gn} = \frac{a_H}{a_H + 1} \text{ dla } \gamma_H = 1, \quad (3.27)$$

$\gamma_H$  – bezwymiarowy stosunek zysków ciepła do strat [-]

$$\gamma_H = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{H,ht}}, \quad (3.28)$$

$a_H$  – bezwymiarowy parametr liczbowy [-]

$$a_H = a_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}}, \quad (3.29)$$

$a_{H,0}$  – bezwymiarowy referencyjny parametr liczbowy ustalany na poziomie krajowym, dla metody miesięcznej  $a_{H,0} = 1$ ,

$\tau_{H,0}$  – stała czasowa odniesienia ustalana na poziomie krajowym, dla metody miesięcznej  $\tau_{H,0} = 15 \text{ h}$ ,

$\tau$  – stała czasowa strefy budynku, charakteryzująca jej wewnętrzną bezwładność cieplną i definiowana (w odniesieniu do modelu jednostrefowego budynku) jako czas potrzebny do zmniejszenia różnicy temperatur wewnętrznej i zewnętrznej o mnożnik  $1/e$ , przy braku zysków wewnętrznych i stałej temperaturze zewnętrznej [godziny]

$$\tau = \frac{C_m / 3600}{H_{tr} + H_{ve}}, \quad (3.30)$$

$C_m$  – wewnętrzna pojemność cieplna pomieszczenia [J/K],

$H_{tr}$  – całkowity współczynnik strat ciepła przez przenikanie [W/K],

$H_{ve}$  – całkowity współczynnik strat ciepła przez wentylację [W/K].

Metoda prezentowana w normie może być wykorzystywana tylko przy ocenie przestrzeni słonecznych nieklimatyzowanych, czyli nie ogrzewanych ani nie chłodzonych. W ścianie oddzielającej między pomieszczeniem mieszkalnym a szklarnią wyklucza się obecność stałych otworów umożliwiających przepływ powietrza – jeżeli takie istnieją, przestrzeń słoneczną należy traktować w obliczeniach jako część przestrzeni klimatyzowanej.

Straty ciepła przez przegrodę oddzielającą między pomieszczeniem klimatyzowanym a przestrzenią słoneczną wyznaczone są z uwzględnieniem współczynnika korekty temperatury  $b_{tr} < 1$ , co oznacza przekazywanie ciepła do środowiska o temperaturze wyższej niż temperatura zewnętrzna. Podczas jego obliczania



(równanie (3.31)) nie bierze się pod uwagę wpływu zysków słonecznych na temperaturę w szklarni  $\theta_s$ , a jedynie przenoszenie ciepła przez ścianę oddzielającą i obudowę szklarni. Jest to kompensowane uwzględnieniem słonecznych zysków pośrednich z przestrzeni słonecznej (równanie (3.36)).

Czynnik korekty temperatury wyznacza się jako:

$$b_{tr} = \frac{\theta_{int,H} - \theta_s}{\theta_{int,H} - \theta_e} = \frac{H_{se}}{H_{is} + H_{se}}, \quad (3.31)$$

$$\theta_s = \frac{\theta_{int,H} \cdot H_{is} + \theta_e \cdot H_{se}}{H_{is} + H_{se}}, \quad (3.32)$$

gdzie:

$\theta_{int,H}$  – nastawa temperatury w pomieszczeniu mieszkalnym dla okresu ogrzewania [°C],

$\theta_e$  – średnia temperatura zewnętrzna w danym kroku obliczeniowym [°C],

$\theta_s$  – średnia temperatura wewnętrzna w przestrzeni słonecznej w danym kroku obliczeniowym [°C],

$H_{is}$  – współczynnik przenoszenia ciepła przez przegrodę oddzielającą między pomieszczeniem mieszkalnym a balkonem [W/K],

$H_{se}$  – współczynnik przenoszenia ciepła przez obudowę balkonu na zewnątrz [W/K].

Zyski ciepła w strefie ogrzewanej budynku uzyskiwane za pośrednictwem szklarni  $Q_{ss}$  traktuje się jako sumę zysków bezpośrednich  $Q_{sd}$  i pośrednich  $Q_{si}$ . Procedura obliczeń zakłada, że wszystkie powierzchnie wewnętrzne przestrzeni słonecznej są w równym stopniu zacieniane przez elementy zewnętrzne poza budynkiem i zewnętrzną obudowę samej szklarni.

$$Q_{ss} = Q_{sd} + Q_{si} \text{ [MJ]}. \quad (3.33)$$

Zyski bezpośrednie docierają do strefy klimatyzowanej poprzez ścianę między szklarnią a pomieszczeniem mieszkalnym. Są to zyski pochodzące od wielokrotnej transmisji (najpierw przez oszklenie przestrzeni słonecznej, a następnie przez elementy oszkłone, np. okna lub drzwi, w ścianie oddzielającej), lub absorpcji promieniowania na powierzchni przegrody oddzielającej (między szklarnią a przestrzenią klimatyzowaną). Zyski bezpośrednie wyznaczane są wg Załącznika E normy [241] jako:

$$Q_{sd} = F_{sh,e} \cdot (1 - F_{F,w}) \cdot g_e \cdot \left( (1 - F_{F,w}) \cdot g_w \cdot A_w + \alpha_p \cdot A_p \cdot \frac{H_{p,tot}}{H_{p,e}} \right) \cdot I_p \cdot t, \quad (3.34)$$

gdzie:

$F_{sh,e}$  – czynnik redukcji ze względu na zacienienie szklarni od przeszkód zewnętrznych (budynków, drzew, wzgórz, elementów tego samego budynku) [-]

$$F_{sh,e} = F_{hor} \cdot F_{ov} \cdot F_{fin}, \quad (3.35)$$

- $F_{hor}$  – czynnik redukcji od horyzontu (dotyczy promieniowania kierunkowego) [-],  
 $F_{ov}$  – czynnik redukcji od zadaszeń (dotyczy promieniowania kierunkowego i rozproszonego) [-],  
 $F_{fin}$  – czynnik redukcji od pilastrów (dotyczy promieniowania kierunkowego i rozproszonego) [-],  
 $F_{Fe}$  – udział powierzchni ramy w powierzchni zewnętrznej oszklenia szklarni [-],  
 $F_{Fw}$  – udział powierzchni ramy w całkowitej powierzchni okna w ścianie oddzielającej [-],  
 $g_e$  – współczynnik przepuszczania energii słonecznej oszklenia szklarni [-],  
 $g_w$  – współczynnik przepuszczania energii słonecznej oszklenia okna w ścianie oddzielającej [-],  
 $A_w$  – powierzchnia okna w ścianie oddzielającej [m<sup>2</sup>],  
 $A_p$  – powierzchnia części nieprzezroczystej ściany oddzielającej [m<sup>2</sup>],  
 $\alpha_p$  – współczynnik absorpcji promieniowania na powierzchni ściany oddzielającej [-],  
 $H_{p,tot}$  – całkowity współczynnik przenoszenia ciepła od środowiska wewnętrznego, przez nieprzezroczystą część ściany oddzielającej i przestrzeń słoneczną do środowiska zewnętrznego [W/K],  
 $H_{p,e}$  – całkowity współczynnik przenoszenia ciepła od powierzchni pochłaniającej (zewnątrznej) przegrody oddzielającej, przez przestrzeń słoneczną do środowiska zewnętrznego [W/K],  
 $I_p$  – suma natężenia promieniowania słonecznego na jednostkę powierzchni ściany oddzielającej w danym kroku obliczeniowym [W/m<sup>2</sup>],  
 $t$  – długość kroku obliczeniowego [Ms].

Zyski pośrednie są to zyski przekazane do powietrza w objętości szklarni za pośrednictwem pochłaniającej promieniowanie i nagrzewającej się obudowy. Traktowane są one jako zyski pochodzące z przestrzeni nieklimatyzowanej, z czynnikiem dostosowania  $(1 - b_{tr})$ . Obliczane są poprzez zsumowanie zysków pochodzących od każdej nieprzezroczystej pochłaniającej powierzchni w objętości szklarni, i odjęcie zysków przekazanych bezpośrednio przez przegrodę oddzielającą na drodze przewodzenia i uwzględnionych w  $Q_{sd}$ :

$$Q_{si} = (1 - b_{tr}) \cdot F_{sh,e} \cdot (1 - F_{F,e}) \cdot g_e \cdot \sum_j (I_j \cdot \alpha_j \cdot A_j) - F_{sh,e} \cdot (1 - F_{F,e}) \cdot g_e \cdot \alpha_p \cdot A_p \cdot \frac{H_{p,tot}}{H_{p,e}} \cdot I_p \cdot t, \quad (3.36)$$

gdzie (pozostałe oznaczenia j.w.):

- $b_{tr}$  – czynnik dostosowania (korekty temperatury) w ciągu miesiąca [-],  
 $I_j$  – suma natężenia promieniowania słonecznego na jednostkę „j-tej” nieprzezroczystej powierzchni wewnętrznej szklarni w danym kroku obliczeniowym [W/m<sup>2</sup>],  
 $\alpha_j$  – współczynnik absorpcji promieniowania na „j-tej” nieprzezroczystej powierzchni wewnętrznej szklarni,  
 $A_j$  – powierzchnia „j-tej” części nieprzezroczystej powierzchni wewnętrznej szklarni [m<sup>2</sup>].

Powyższa metoda określana jest jako metoda dokładna. Na poziomie krajowym dopuszczalne jest stosowanie metody uproszczonej, zawierającej następujące modyfikacje:

- w strefie mieszkalnej ignorowane są zyski słoneczne pochodzące ze szklani – do bilansu cieplnego nie wlicza się ani zysków bezpośrednich „dostarczanych” przez część pełną i oszkloną ściany oddzielającej, ani zysków pośrednich z absorpcji przez obudowę szklarni,
- zyski te są uwzględniane w sposób zastępczy, poprzez wykorzystanie skorygowanego współczynnika dostosowania temperatury  $b_{tr}^*$  podczas obliczania strat ciepła z przestrzeni ogrzewanej do przestrzeni słonecznej; przyjmuje się wówczas, że temperatura wewnątrz szklarni  $\theta_s^*$  jest wynikiem nie tylko napływu i odpływu ciepła przez obudowę, ale także zysków słonecznych w jej objętości:

$$b_{tr}^* = \frac{\theta_{int,H} - \theta_s^*}{\theta_{int,H} - \theta_e} \neq b_{tr} = \frac{H_{se}}{H_{is} + H_{se}}, \quad (3.37)$$

$$\theta_s^* = \frac{\Phi_u + \theta_{int,H} \cdot H_{is} + \theta_e \cdot H_{se}}{H_{is} + H_{se}}, \quad (3.38)$$

gdzie:

$\Phi_u$  – średnie zyski słoneczne w objętości szklarni w kroku obliczeniowym [W].

Opisane wyżej metody wymagają pewnego komentarza, gdyż zdaniem autorki podane w normie wzory nie są do końca spójne. Po pierwsze, we wzorach (3.34) i (3.36) mnożnik  $F_{sh,e} \cdot (1 - F_{F,e}) \cdot g_e$  dotyczy cech obudowy zewnętrznej, tzn. zacięniania, udziału powierzchni ram i przepuszczalności oszklenia. Powinien więc być połączony z natężeniem promieniowania padającego na obudowę zewnętrzną, a nie natężeniem promieniowania docierającego do ściany oddzielającej  $I_p$  czy wewnętrznej części obudowy  $I_j$ . Po drugie, odjęcie we wzorze (3.36) składnika dotyczącego zysków bezpośrednich przez obudowę oznacza, że zyski te nie są uwzględniane w ogóle w obliczeniach. Należałoby składnik odejmowany pomnożyć również przez  $(1 - b_{tr})$ , co fizycznie można zinterpretować jako pomniejszenie zysków pośrednich pochodzących od ściany oddzielającej o część bezpośrednio przewodzoną do wnętrza przestrzeni mieszkalnej. Taki zapis znajduje się w szkicu normy, udostępnionym przez CEN w 2007 w celu zgłaszania komentarzy przed opublikowaniem wersji końcowej [116]. Po trzecie, mnożnik „t” oznaczający długość kroku obliczeniowego występuje we wzorach (3.34) i (3.36) przy składowej  $I_p$ , a jest pominięty przy składowej  $I_j$ .

Norma nie precyzuje również, w jaki sposób określać rozkład natężenia promieniowania wewnątrz przestrzeni słonecznej, oraz czy przy jego obliczaniu należy uwzględniać zyski słoneczne tracone na zewnątrz szklarni poprzez odbicie lub

zyski transmitowane do wnętrza strefy mieszkalnej. Biorąc pod uwagę powyższe zastrzeżenia, autorka proponowałaby obliczanie zysków  $Q_{sd}$  i  $Q_{si}$  w następujący sposób:

$$Q_{sd} = \left( (1 - F_{F,w}) \cdot g_w \cdot A_w + \alpha_p \cdot A_p \cdot \frac{H_{p,tot}}{H_{p,e}} \right) \cdot I_p \cdot t, \quad (3.39)$$

gdzie (pozostałe oznaczenia j.w.):

$$I_p = f_p \cdot \frac{1}{A_w + A_p} \cdot \sum_k F_{sh,ek} \cdot A_{sol,k} \cdot I_{sol,k}, \quad (3.40)$$

$f_p$  – część promieniowania słonecznego przepuszczonego do wnętrza szklarni, padająca na powierzchnię ściany oddzielającej [-],

$k$  – liczba powierzchni zbierających (oszkłonych) zewnętrznej obudowy szklarni skierowanych na poszczególne strony świata,

$F_{sh,ek}$  – czynnik redukcji ze względu na zacienienie od przeszkód zewnętrznych powierzchni zbierającej „k” szklarni [-],

$A_{sol,k}$  – efektywne pole powierzchni zbierającej „k” szklarni [ $m^2$ ]

$$A_{sol,k} = (1 - F_{F,ek}) \cdot g_{ek} \cdot A_{ek}, \quad (3.41)$$

$F_{F,ek}$  – udział powierzchni ramy w powierzchni zewnętrznego oszklenia szklarni na płaszczyźnie „k” [-],

$g_{ek}$  – współczynnik przepuszczania energii słonecznej oszklenia szklarni przez powierzchnię „k” [-],

$A_{ek}$  – powierzchnia zewnętrznego oszklenia szklarni na płaszczyźnie „k” [ $m^2$ ],

$I_{sol,k}$  – natężenie promieniowania słonecznego na płaszczyźnie „k” zewnętrznej obudowy szklarni [ $W/m^2$ ].

$$Q_{si} = (1 - b_{tr}) \left( \sum_j (I_j \cdot \alpha_j \cdot A_j) - \alpha_p \cdot A_p \cdot \frac{H_{p,tot}}{H_{p,e}} \cdot I_p \right) \cdot t, \quad (3.42)$$

gdzie (pozostałe oznaczenia j.w.):

$$I_j = f_j \cdot \frac{1}{A_j} \cdot \sum_k F_{sh,ek} \cdot A_{sol,k} \cdot I_{sol,k}, \quad (3.43)$$

$f_j$  – część promieniowania słonecznego przepuszczonego do wnętrza szklarni, padająca na powierzchnię „j” wewnętrznej obudowy [-].

Propozycje wyznaczania współczynników  $f_p$  i  $f_j$  przedstawiono w punkcie 3.7.

### 3.4. Metoda DIN 18599-2

Grupa norm DIN 18599 służy kompleksowej ocenie efektywności energetycznej budynków i obejmuje zagadnienia dotyczące ogrzewania, chłodzenia, ogrzewania ciepłej wody użytkowej, wentylacji i oświetlenia. Norma DIN 18599-2 [58] zawiera sposób obliczeń zapotrzebowania na ciepło i chłód poszczególnych stref w budynkach mieszkalnych i użyteczności publicznej. Zapotrzebowanie na energię wyznaczane jest analogicznie do metody przyjętej w ISO 13790, czyli z wykorzystaniem empirycznie ustalonego współczynnika wykorzystania zysków ciepła.

Sposób uwzględniania zysków słonecznych pochodzących od nieogrzewanych szklarni łączy elementy metody pełnej i uproszczonej stosowanej w ISO 13790 (tabela 3.1). Zdaniem autorki jest on jednak bardziej przejrzysty i lepiej oddaje zachodzące fizycznie zjawiska wymiany energii, przy zachowaniu stosunkowo prostej metody obliczeń.

W metodzie tej zakłada się, że dodatkowe zyski słoneczne w przestrzeni ogrzewanej  $Q_{S,tr}$  pochodzą tylko od bezpośredniej transmisji przez oszkloną część przegrody oddzielającej, natomiast pomija się zyski pośrednie generowane przez pozostałą część obudowy pełnej [58]:

$$Q_{S,tr} = F_{F,iu} \cdot A_{iu} \cdot g_{eff,iu} \cdot F_{F,ue} \cdot \tau_{e,ue} \cdot I_S \cdot t, \quad (3.44)$$

gdzie:

$F_{F,iu}$  – udział powierzchni ramy w całkowitej powierzchni okna w ścianie oddzielającej [-],

$F_{F,ue}$  – udział powierzchni ramy w powierzchni zewnętrznego oszklenia szklarni [-],

$A_{iu}$  – całkowita powierzchnia okna w ścianie oddzielającej [ $m^2$ ],

$g_{eff,iu}$  – współczynnik całkowitej przepuszczalności energii słonecznej dla oszklenia okna w ścianie oddzielającej; zakłada się, że współczynnik ten bierze pod uwagę zacieniające elementy zewnętrzne, ruchome lub stałe osłony, a także zabrudzenie szyb [-],

$\tau_{e,ue}$  – transmisyjność promieniowania słonecznego przez oszklenie zewnętrzne szklarni [-],

$I_S$  – całkowite natężenie promieniowania słonecznego na jednostkę zewnętrznego powierzchni szklarni o danej orientacji w danym kroku obliczeniowym [ $W/m^2$ ],

$t$  – długość kroku obliczeniowego [h].

Zyski bezpośrednie pochodzące od przewodzenia przez przegrodę oddzielającą nie są obliczane, ale uwzględnia się je w sposób pośredni, przyjmując że temperatura w szklarni jest podwyższona na skutek działania promieniowania słonecznego (w metodzie pełnej ISO 13790 nie uwzględniano efektu buforowego przestrzeni słonecznej). Wzór na temperaturę w objętości szklarni jest analogiczny do wzoru (3.38), z tym że inaczej oblicza się średnie zyski słoneczne  $\Phi_u$ , odliczając ilość energii przekazanej przez oszklone elementy przegrody oddzielającej:

$$\Phi_u = \sum_i \Phi_{S,ui} - \frac{\sum_j \rho_{S,trj}}{t}, \quad (3.45)$$

gdzie:

i – liczba płaszczyzn oszklenia obudowy zewnętrznej szklarni,

j – liczba elementów oszklonych (okna, drzwi) w przegrodzie oddzielającej,

$\Phi_{S,u}$  – zyski słoneczne w szklarni pochodzące od poszczególnych oszklonych płaszczyzn jej obudowy [W]

$$\Phi_{S,u} = F_{F,ue} \cdot A_{ue} \cdot g_{eff,ue} \cdot I_S, \quad (3.46)$$

$g_{eff,ue}$  – współczynnik całkowitej przepuszczalności energii słonecznej dla oszklenia zewnętrznego szklarni; zakłada się, że współczynnik ten bierze pod uwagę zacięniające elementy zewnętrzne, ruchome lub stałe osłony, a także zabrudzenie szyb [-].

**Tabela 3.1.** Porównanie wybranych metod quasi-stacjonarnych obliczania zysków energetycznych pochodzących od szklarni. Opracowanie własne.

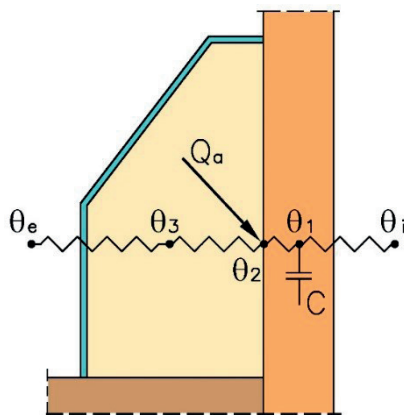
| Lp. | Metoda                 | Zyski słoneczne w przestrzeni mieszkalnej                      |                                                                                     | Temperatura wewnętrzna szklarni                                                                |
|-----|------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                        | Bezpośrednie                                                   | Pośrednie                                                                           |                                                                                                |
| 1.  | ISO 13790, pełna       | Pochodzące z części oszklonej i pełnej przegrody oddzielającej | Pochodzące z części pełnej obudowy szklarni (z wyłączeniem przegrody oddzielającej) | Bez uwzględnienia zysków słonecznych                                                           |
| 2.  | ISO 13790, uproszczona | Nie uwzględniono                                               | Nie uwzględniono                                                                    | Z uwzględnieniem zysków słonecznych                                                            |
| 3.  | DIN 18599-2            | Pochodzące z części oszklonej przegrody oddzielającej          | Nie uwzględniono                                                                    | Z uwzględnieniem zysków słonecznych (pomniejszonych o transmisję do przyległego pomieszczenia) |

### 3.5. Uprozczone metody godzinowe

Uprozczone metody godzinowe pozwalają na bezpośrednie uwzględnienie w obliczeniach dynamiki cieplnej budynku [290]. Modelowanie wykorzystuje analogię do sieci elektrycznej – elementy obudowy, systemy wewnętrzne charakteryzowane są przez opory (R) lub traktowane są jako elementy magazynujące energię (C) [224]. W metodzie tej nie uwzględnia się współczynnika wykorzystania zysków ciepła, jak to ma miejsce w metodach quasi-stacjonarnych. Krok obliczeniowy to 1 godzina, co pozwala bardziej dokładnie odwzorować chwilowe

zmiany temperatury wewnętrznej i zewnętrznej, nasłonecznienia, zachowania użytkowników i powiązać je z działaniem systemów instalacyjnych [105]. Najczęściej stosowanym modelem jest 5R1C, w którym na podstawie zestawu równań różniczkowych wyznacza się temperaturę w poszczególnych węzłach [189, 203].

Wymiana ciepła w budynkach z systemami szklarniowymi może być również charakteryzowana w podobny sposób. Praca [13] przedstawia prosty model szklarni połączonej z budynkiem, zawierający cztery opory i jeden element pojemnościowy (rys. 3.2).



Rys. 3.2. Schemat sieci reprezentującej szklarnię przy budynku, wg [13].

Układ równań przedstawiających bilans energii w węzłach 1, 2 i 3 można zapisać jako [13]:

$$U_{i1}(\theta_{i(t)} - \theta_{1(t)}) + U_{12}(\theta_{2(t)} - \theta_{1(t)}) = \frac{C \cdot (\theta_{1(t+1)} - \theta_{1(t)})}{\Delta t}, \quad (3.47)$$

$$U_{12}(\theta_{1(t)} - \theta_{2(t)}) + U_{23}(\theta_{3(t)} - \theta_{2(t)}) + Q_{a(t)} = 0, \quad (3.48)$$

$$U_{23}(\theta_{2(t)} - \theta_{3(t)}) + U_{3e}(\theta_{e(t)} - \theta_{3(t)}) = 0, \quad (3.49)$$

gdzie:

$U_{i1}$  – współczynnik przenikania ciepła między węzłem i oraz 1 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ],

$U_{12}$  – współczynnik przenikania ciepła między węzłem 1 i 2 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ],

$U_{23}$  – współczynnik przenikania ciepła między węzłem 2 i 3 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ],

$U_{3e}$  – współczynnik przenikania ciepła między węzłem 3 oraz e [ $W/(m^2 \cdot K)$ ],

$\theta_i$  – temperatura powietrza wewnętrznego [ $^{\circ}C$ ],

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$  – temperatura w węzłach 1, 2 i 3 [ $^{\circ}C$ ],

$\theta_e$  – temperatura powietrza zewnętrznego [ $^{\circ}C$ ],



$C$  – pojemność cieplna ściany oddzielającej [J/K],

$\Delta t$  – długość kroku czasowego [s],

$Q_a$  – natężenie promieniowania słonecznego pochłoniętego na powierzchni ściany oddzielającej [W/m<sup>2</sup>],

$t, t+1$  – kolejne kroki czasowe.

Po odpowiednich przekształceniach, zakładając mały krok czasowy, przybliżone temperatury w poszczególnych węzłach można wyznaczyć z zależności:

$$\theta_{1(t+1)} = \theta_{1(t)} + \left[ U_{i1} (\theta_{i(t)} - \theta_{1(t)}) + U_{12} (\theta_{2(t)} - \theta_{1(t)}) \right] \cdot \frac{\Delta t}{C}, \quad (3.50)$$

$$\theta_{2(t+1)} = \frac{U_{12} \cdot \theta_{1(t)} + U_{23} \cdot \theta_{3(t)} + Q_{a(t)}}{(U_{12} + U_{23})}, \quad (3.51)$$

$$\theta_{3(t+1)} = \frac{U_{23} \cdot \theta_{2(t)} + U_{3e} \cdot \theta_{e(t)}}{(U_{23} + U_{3e})}. \quad (3.52)$$

Prosta metoda godzinowa, odwzorowująca szklarnię przy pomocy sieci elektrycznej, zaprezentowana jest także w normie [241] i późniejszych publikacjach [5, 225], modyfikujących i rozszerzających oba te modele.

### 3.6. Symulacje dynamiczne

Metody symulacyjne, o większym stopniu złożoności, przeznaczone są do wykonywania obliczeń komputerowych. Krok obliczeniowy przyjmowany jest znacznie krótszy niż w metodach quasi-stacjonarnych – może to być np. jedna godzina lub kilkanaście minut. Pozwala to uwzględnić procesy wymiany ciepła uzależnione od zmian temperatury i działania promieniowania słonecznego jako dynamiczne procesy dyskretnie [42, 73]. Symulacje dynamiczne mogą też służyć do swego rodzaju „walidacji” metod mniej dokładnych (takich jak metody quasi-stacjonarne) [124, 149]. Metody te wymagają szczegółowych danych klimatycznych opracowanych dla co najmniej godzinnych odstępów czasu.

Postulaty związane z możliwością wykorzystania ogólnodostępnych narzędzi symulacyjnych do modelowania systemów szklarniowych, sformułowane na podstawie różnych prac badawczych (m. in. [197, 214, 215, 266, 30, 301]) zawarto w sposób syntetyczny w pracy [99]. Główne wymagania, jakie powinny spełniać programy komputerowe aby we właściwy sposób wyznaczyć zyski słoneczne w pomieszczeniach o dużym stopniu oszklenia, są następujące:

- możliwość definicji rzeczywistej geometrii pomieszczenia i elementów oszkłonych, uwzględniającej ich wymiary, umiejscowienie w przegrodach i orientację względem stron świata; konieczne jest również uwzględnianie kierunkowych właściwości optycznych oszklenia;
- dokładna analiza promieniowania słonecznego docierającego do obudowy pomieszczeń, przyjmująca podział na składową kierunkową i rozproszoną, a także odpowiednio dokładne modelowanie promieniowania padającego na płaszczyzny nachylone (np. z wykorzystaniem modeli uwzględniających anizotropowość promieniowania rozproszonego);
- wyznaczanie promieniowania transmitowanego do wnętrza pomieszczeń na podstawie rzeczywistej drogi wiązki przechodzącej przez oszklenie; niewystarczający jest rozdział promieniowania kierunkowego padającego na poszczególne przegrody wewnętrzne przy pomocy ważonych współczynników proporcjonalności (uwzględniających powierzchnię i cechy optyczne przegrody, tj. zdolność absorpcji i odbicia promieniowania) lub współczynników konfiguracji stosowanych do modelowania radiacyjnej wymiany ciepła
- możliwość uwzględnienia radiacyjnej wymiany ciepła z nieboskłonem.

W niniejszej pracy obliczenia przeprowadzone zostaną przy pomocy symulacji komputerowych bazujących na metodzie objętości kontrolnych, wykonanych w programie BSim spełniającym powyższe zalecenia [306]. W metodzie tej elementy konstrukcji budynku i zamknięte strefy powietrza reprezentowane są przez punkty węzłowe o określonych właściwościach fizycznych. Procesy ciągłe w czasie modelowane są poprzez podział na kroki czasowe o skończonej długości, wynoszącej najczęściej od kilku do kilkunastu minut.

Dla każdej ze stref powietrza formułowany jest bilans uwzględniający strumień ciepła przepływającego przez obudowę, transmisję promieniowania słonecznego przez elementy przezroczyste, strumienie ciepła wytwarzanego przez systemy instalacyjne oraz przenoszonego przez wentylację, infiltrację lub międzystrefowe mieszanie powietrza. Ogólne równanie bilansu energetycznego dla pojedynczej strefy (przy założeniu braku akumulacji ciepła w objętości powietrza) ma postać [306]:

$$\theta_z \cdot \left( \sum_i \frac{A_i}{R_{si}} + \sum_j A_{wj} \cdot U_{wj} + \sum_k \psi_k \cdot l_k + v \cdot \rho \cdot c_p \cdot (n_e + \sum_m n_{zm}) \right) =$$

$$= \sum_i \frac{A_i}{R_{si}} \cdot \theta_s + \left( \sum_j A_{wj} \cdot U_{wj} + \sum_k \psi_k \cdot l_k \right) \cdot \theta_e + \bar{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (n_e \cdot \theta_e + \sum_k n_{zk} \cdot \theta_{zk}) + \Phi_{z,sol} + \Phi_{z,syst},$$

(3.53)

gdzie:

i – liczba przegród ograniczających strefę,

$j$  – liczba otworów okiennych, świetlików, drzwi balkonowych lub innych elementów oszklonych w obudowie strefy,  
 $k$  – liczba mostków termicznych w obudowie strefy,  
 $m$  – liczba stref,  
 $\theta_z$  – temperatura powietrza w strefie [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $\theta_s$  – temperatura powierzchni wewnętrznych przegród ograniczających strefę [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $\theta_e$  – temperatura powietrza zewnętrznego [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $A$  – powierzchnia przegród ograniczających strefę [ $\text{m}^2$ ],  
 $A_w$  – powierzchnia przegród oszklonych [ $\text{m}^2$ ],  
 $R_{si}$  – opór przejmowania ciepła na wewnętrznych powierzchniach przegród ograniczających strefę [ $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ],  
 $U_w$  – współczynnik przenikania ciepła elementów oszklonych w obudowie strefy [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],  
 $\psi$  – liniowy współczynnik przenikania ciepła mostków termicznych [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ],  
 $l$  – długość mostków termicznych [ $\text{m}$ ],  
 $v$  – objętość powietrza w danej strefie [ $\text{m}^3$ ],  
 $\rho$  – gęstość powietrza [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  
 $c_p$  – ciepło właściwe powietrza [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ],  
 $n_e$  – liczba wymian powietrza między strefą a powietrzem zewnętrznym [ $1/\text{s}$ ],  
 $n_z$  – liczba wymian powietrza między strefą a strefami sąsiednimi [ $1/\text{s}$ ],  
 $\Phi_{z,\text{sol}}$  – strumień ciepła dostarczony do strefy przez promieniowanie słoneczne [ $\text{W}$ ],  
 $\Phi_{z,\text{syst}}$  – strumień ciepła dostarczony do strefy przez instalacje grzewcze lub chłodnicze [ $\text{W}$ ].

Przenoszenie ciepła w elementach konstrukcji jest przyjmowane jako niestacjonarne, z uwzględnieniem pojemności cieplnej każdej warstwy materiału. Dla każdego elementu kontrolnego wyznacza się ilość ciepła dostarczanego i usuwanego do elementów sąsiednich. Bilans energetyczny pozwala na ocenę zmiany entalpii elementu w kolejnych krokach obliczeniowych, co dzięki znajomości ciepła właściwego materiału pozwala określić zmianę temperatury.

Obliczenia dla całego zdefiniowanego układu w każdym kroku czasowym są przeprowadzane w następujący sposób [306]:

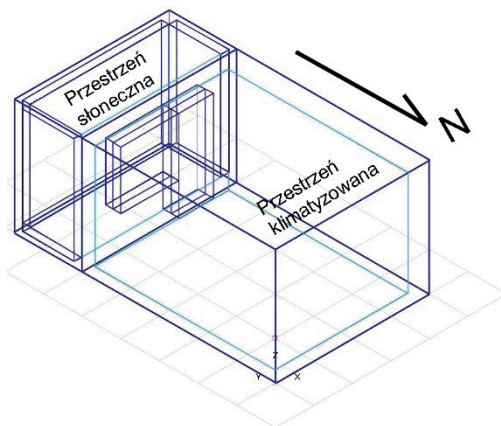
- w pierwszym kroku obliczeniowym temperatura powietrza jest obliczana na podstawie bilansu ciepła doprowadzonego do strefy w danym kroku i traconego w kroku poprzednim,
- korzystając z tak obliczonej temperatury powietrza wyznacza się temperaturę w elementach obudowy biorąc pod uwagę niestacjonarny przepływ ciepła,
- obliczenia temperatury powietrza w danej strefie przeprowadzane są ponownie z uwzględnieniem aktualnych strat ciepła.

Jako dane klimatyczne do programu mogą być wprowadzane dane użytkownika (np. z własnych pomiarów), lub dane reprezentujące typowe lata meteorologiczne przygotowane zgodnie z obowiązującymi w danym kraju procedurami. Zakres niezbędnych parametrów wejściowych obejmuje temperaturę powietrza, natężenie promieniowania słonecznego kierunkowego i rozproszonego oraz wilgotność

względą powietrza. Pożądane mogą być także dane dotyczące kierunku i prędkości wiatru, szczególnie jeśli planowane jest bardziej dokładne modelowanie naturalnej wymiany powietrza.

### 3.7. Porównanie wybranych metod obliczeniowych

Metody o największym znaczeniu praktycznym w Polsce to przede wszystkim metody opisane w normie EN ISO 13790. Co prawda polska wersja normy nie jest przywołana w rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [211], jednak oparta jest na niej metodologia sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej [267]. Zapotrzebowanie na energię obliczone przy pomocy metody pełnej i uproszczonej mogą znacznie różnić się między sobą. Aby to zilustrować, poniżej przedstawiono wyniki jakie uzyskano dla przykładowego pomieszczenia mieszkalnego sąsiadującego z przestrzenią słoneczną, wyznaczone z wykorzystaniem algorytmów zmodyfikowanych przez autorkę w sposób opisany w punkcie 3.3. Rezultaty obliczeń porównano z symulacjami dynamicznymi takiego samego układu pomieszczeń, przeprowadzonymi przy założeniach jak najbardziej zbliżonych do założeń metod stanu ustalonego (pominięcie promieniowania odbitego od powierzchni terenu oraz modelowanie natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyzny pionowe przy zastosowaniu izotropowego modelu promieniowania rozproszonego).



Rys. 3.3. Schemat pomieszczeń w programie BSIm.

Przykładowe pomieszczenie ma dwie ściany zewnętrzne – ściana skierowana na południe sąsiaduje z oszklonym balkonem, a ściana pełna skierowana na wschód styka się z powietrzem zewnętrznym (rys. 3.3). Izolacyjność cieplna przegród jest dosyć wysoka, co odpowiada budynkom powstającym po 2014 roku (tabela 3.2).

Poza zyskami słonecznymi w pomieszczeniu mieszkalnym założono zyski bytowe na poziomie  $3,0 \text{ W/m}^2$  (wg załącznika G PN-EN ISO 13790). Wymiana powietrza w pomieszczeniu wynosi  $0,5 \text{ 1/h}$ , przy czym jest ono doprowadzane z zewnątrz, aby spełnić założenie normy o braku przepływu powietrza między szklarnią a przestrzenią klimatyzowaną. W obliczeniach posłużono się danymi klimatycznymi Typowego Roku Meteorologicznego dla Warszawy [201].

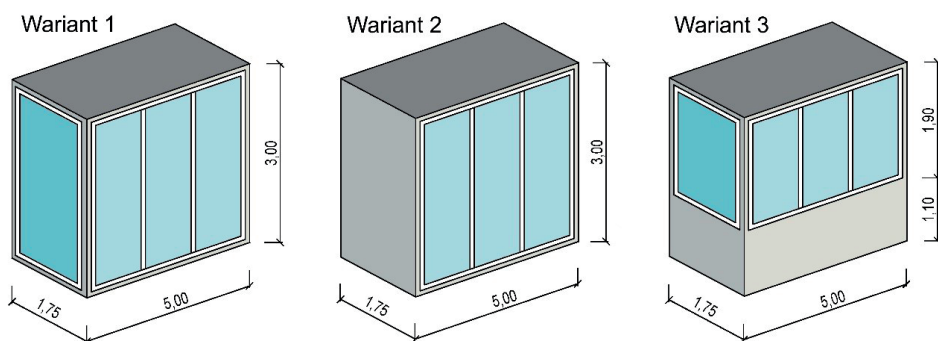
**Tabela 3.2.** Wybrane parametry przegród zewnętrznych.

| Lp. | Rodzaj pomieszczenia     | Współczynnik przenikania ciepła U<br>[W/(m <sup>2</sup> ·K)] |                  | Współczynnik całkowitej<br>przepuszczalności energii<br>słonecznej g [-] |
|-----|--------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|     |                          | Część pełna                                                  | Stolarka okienna | Oszklenie                                                                |
| 1.  | Pomieszczenie mieszkalne | 0,24                                                         | 1,20 - 1,23      | 0,63                                                                     |
| 2.  | Balkon                   | 0,50                                                         | 1,66 - 1,69      | 0,62                                                                     |

Analizie poddano trzy typy oszkleń (rys. 3.4):

- na całą wysokość balkonu i na wszystkich ścianach (skierowanych na południe, wschód i zachód) – wariant 1,
- na całą wysokość balkonu i tylko na ścianie skierowanej na południe – wariant 2,
- powyżej wysokości 1,1 m i na wszystkich ścianach – wariant 3.

Założono, że zdolność absorpcji promieniowania na wewnętrznych powierzchniach szklarni wynosi 0,2, 0,5 lub 0,8.



**Rys. 3.4.** Schematy rozmieszczenia oszkleń w przestrzeni słonecznej.

Jednym z ważniejszych założeń obliczeniowych jest przyjęcie określonej dystrybucji promieniowania słonecznego wewnątrz szklarni. Wyznaczając zapotrzebowanie na ciepło wg [241] pomija się straty promieniowania krótkofalowego przez

odbicie na zewnątrz, co jest na ogół słuszne w przypadku pomieszczeń o niezbyt dużej powierzchni przegród oszklonych [60]. W pomieszczeniach o znacznym stopniu oszklenia, takich jak szklarnie, założenie tego rodzaju jest zbyt dużym uproszczeniem, o czym wspomniano już wcześniej. W symulacjach dynamicznych uwzględniono więc straty promieniowania na skutek retransmisji, co zgodne jest z fizycznym charakterem zjawisk.

W obliczeniach wg metody uproszczonej normy [241] pominięto retransmisję na zewnątrz szklarni. Takie założenie jest przyjmowane w literaturze przedmiotu ([166]) jako spójne z ogólną metodyką normy i „usprawiedliwione” faktem, że metoda uproszczona z założenia zaniża efekty oddziaływania promieniowania słonecznego na pomieszczenie mieszkalne w wyniku pominięcia zysków słonecznych transmitowanych przez oszklenie w ścianie oddzielającej do jego wnętrza. W metodzie pełnej zakłada się, że zyski słoneczne w przestrzeni klimatyzowanej pochodzą od promieniowania pochłoniętego na powierzchni przegród pełnych szklarni lub przepuszczonego przez oszklenie w ścianie oddzielającej, uzależniając je od cech optycznych powierzchni. Oznacza to, że efektywnie wykorzystana jest jedynie dawka promieniowania docierającego do danej powierzchni przed pierwszym odbiciem, a zjawiska związane z wielokrotnym odbiciem wewnątrz szklarni są pominięte. Skutkiem tego jest niedoszacowanie temperatury powietrza w przestrzeni słonecznej.

Opromieniowanie poszczególnych powierzchni wewnątrz szklarni w rzeczywistości nie jest jednakowe. Ze względu na ruch Słońca na nieboskłonie, można oczekiwać że natężenie promieniowania kierunkowego na ścianie oddzielającej i podłodze będzie największe. Dokładne metody analityczne wyznaczają te wielkości śledząc drogę promieni słonecznych („ray tracing”), jak np. w [91, 197, 290]. Podstawy założeń metody prezentowane były w [74], a możliwości jej włączenia do obliczeń energetycznych budynków opracowano m. in. w [36, 77, 158, 186, 261, 262, 263, 266].

Rozkład rozproszonego promieniowania słonecznego padającego na dane powierzchnie może zostać określony w różny sposób:

- zakładając, że rozdział promieniowania jest proporcjonalny do absorpcyjności powierzchni i ich wielkości (jest to najprostszy sposób podawany w literaturze [166, 197, 214]),
- wykorzystując współczynniki konfiguracji („view factors”), określające jaką część promieniowania pochodzącego z jednej powierzchni dociera do powierzchni drugiej w zależności od ich wzajemnego położenia i geometrii (współczynniki te dostępne są np. w [61, 278, 305]),
- korzystając ze specjalistycznych programów numerycznych (np. [261, 262, 263]).

W danym przykładzie posłużono się metodą pierwszą, wyznaczając współczynniki  $f$  jako:

$$f_j = \frac{\alpha_j \cdot A_j}{\sum_{pow.wewn.} (1 - \rho_j) \cdot A_j}, \quad (3.54)$$

gdzie:

j – dana powierzchnia pełna wewnątrz szklarni,

$\alpha$  – absorpcyjność powierzchni [-],

$\rho$  – odbijalność powierzchni [-],

A – pole powierzchni [m<sup>2</sup>].

Współczynniki te wykorzystano do rozdziału promieniowania całkowitego (sumy promieniowania kierunkowego i rozproszonego). Nie jest to do końca właściwe w sensie fizycznym, jednak takie uproszczenie przyjęto, ponieważ metoda EN ISO 13790 nie zakłada rozdziału promieniowania na poszczególne składowe. Założenie to zaniża bezpośrednie zyski solarne w przestrzeni ogrzewanej, czyli jest po stronie „bezpiecznej”.

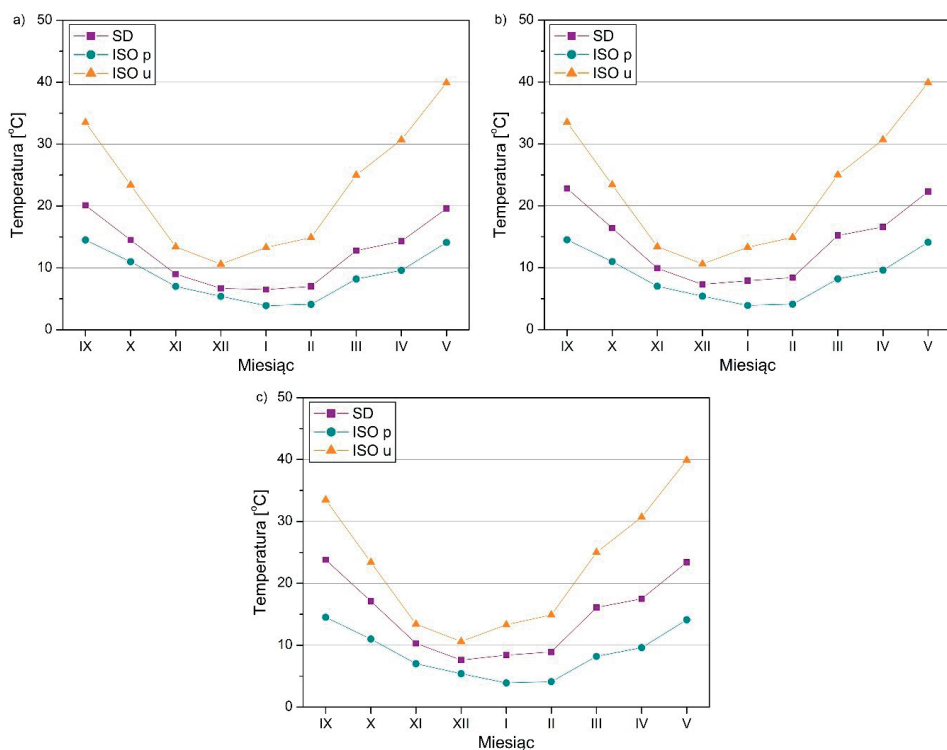
Porównując wybrane metody obliczeniowe poniżej przedstawiono podstawowe parametry charakteryzujące funkcjonowanie systemu: temperaturę powietrza i zyski słoneczne w szklarni oraz zapotrzebowanie na energię w pomieszczeniu mieszkalnym (tabela 3.3 i 3.4).

**Tabela 3.3.** Temperatura powietrza w szklarni podczas sezonu grzewczego. SD – symulacje dynamiczne, ISO p – metoda pełna, ISO u – metoda uproszczona.

| Lp. | Temperatura powietrza w szklarni [°C] |                |       |      |      |      |      |      |      |      |      | MAPE [%] |       |
|-----|---------------------------------------|----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|-------|
|     | Miesiąc                               |                |       | IX   | X    | XI   | XII  | I    | II   | III  | IV   |          | V     |
| 1.  | Wariant 1                             | $\alpha = 0,2$ | SD    | 17,9 | 12,5 | 7,2  | 5,1  | 4,2  | 4,8  | 10,2 | 12,2 | 18,0     |       |
| 2.  |                                       |                | ISO p | 14,1 | 10,4 | 6,1  | 4,4  | 2,7  | 3,0  | 7,3  | 8,8  | 13,6     | 24,6  |
| 3.  |                                       |                | ISO u | 37,1 | 24,6 | 13,3 | 10,2 | 12,6 | 15,0 | 26,8 | 34,8 | 46,7     | 145,5 |
| 4.  |                                       | $\alpha = 0,5$ | SD    | 20,8 | 14,3 | 8,1  | 5,7  | 5,3  | 6,0  | 12,5 | 14,8 | 21,5     |       |
| 5.  |                                       |                | ISO p | 14,1 | 10,4 | 6,1  | 4,4  | 2,7  | 3,0  | 7,3  | 8,8  | 13,6     | 36,1  |
| 6.  |                                       |                | ISO u | 37,1 | 24,6 | 13,3 | 10,2 | 12,6 | 15,0 | 26,8 | 34,8 | 46,7     | 105,2 |
| 7.  |                                       | $\alpha = 0,8$ | SD    | 22,2 | 15,2 | 8,5  | 6,0  | 6,0  | 6,7  | 13,7 | 16,2 | 23,4     |       |
| 8.  |                                       |                | ISO p | 14,1 | 10,4 | 6,1  | 4,4  | 2,7  | 3,0  | 7,3  | 8,8  | 13,6     | 40,8  |
| 9.  |                                       |                | ISO u | 37,1 | 24,6 | 13,3 | 10,2 | 12,6 | 15,0 | 26,8 | 34,8 | 46,7     | 89,0  |
| 10. | Wariant 2                             | $\alpha = 0,2$ | SD    | 20,1 | 14,5 | 9,0  | 6,7  | 6,5  | 7,0  | 12,8 | 14,3 | 19,6     |       |
| 11. |                                       |                | ISO p | 14,5 | 11,0 | 7,0  | 5,4  | 3,9  | 4,1  | 8,2  | 9,6  | 14,1     | 30,1  |
| 12. |                                       |                | ISO u | 33,5 | 23,4 | 13,4 | 10,6 | 13,3 | 14,9 | 25,0 | 30,7 | 39,9     | 84,8  |
| 13. |                                       | $\alpha = 0,5$ | SD    | 22,8 | 16,4 | 9,9  | 7,3  | 7,9  | 8,4  | 15,2 | 16,6 | 22,3     |       |
| 14. |                                       |                | ISO p | 14,5 | 11,0 | 7,0  | 5,4  | 3,9  | 4,1  | 8,2  | 9,6  | 14,1     | 38,9  |
| 15. |                                       |                | ISO u | 33,5 | 23,4 | 13,4 | 10,6 | 13,3 | 14,9 | 25,0 | 30,7 | 39,9     | 60,5  |
| 16. |                                       | $\alpha = 0,8$ | SD    | 23,8 | 17,1 | 10,3 | 7,6  | 8,4  | 8,9  | 16,1 | 17,5 | 23,4     |       |
| 17. |                                       |                | ISO p | 14,5 | 11,0 | 7,0  | 5,4  | 3,9  | 4,1  | 8,2  | 9,6  | 14,1     | 41,7  |
| 18. |                                       |                | ISO u | 33,5 | 23,4 | 13,4 | 10,6 | 13,3 | 14,9 | 25,0 | 30,7 | 39,9     | 52,7  |



| Lp. | Temperatura powietrza w szklarni [°C] |                |       |      |      |      |     |     |      |      |      | MAPE |      |
|-----|---------------------------------------|----------------|-------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|
|     | Miesiąc                               |                | IX    | X    | XI   | XII  | I   | II  | III  | IV   | V    | [%]  |      |
| 19. | Wariant 3                             | $\alpha = 0,2$ | SD    | 19,2 | 13,6 | 8,4  | 6,3 | 5,6 | 6,2  | 11,6 | 13,7 | 19,3 |      |
| 20. |                                       |                | ISO p | 14,2 | 10,4 | 6,2  | 4,5 | 2,8 | 3,1  | 7,4  | 8,9  | 13,7 | 34,0 |
| 21. |                                       |                | ISO u | 27,3 | 18,6 | 10,3 | 7,8 | 8,5 | 10,0 | 18,5 | 23,7 | 32,6 | 48,8 |
| 22. |                                       | $\alpha = 0,5$ | SD    | 21,1 | 14,8 | 9,0  | 6,7 | 6,3 | 7,0  | 13,2 | 15,4 | 21,6 |      |
| 23. |                                       |                | ISO p | 14,2 | 10,4 | 6,2  | 4,5 | 2,8 | 3,1  | 7,4  | 8,9  | 13,7 | 40,2 |
| 24. |                                       |                | ISO u | 27,3 | 18,6 | 10,3 | 7,8 | 8,5 | 10,0 | 18,5 | 23,7 | 32,6 | 34,2 |
| 25. |                                       | $\alpha = 0,8$ | SD    | 22,0 | 15,3 | 9,2  | 6,8 | 6,6 | 7,4  | 13,8 | 16,1 | 22,6 |      |
| 26. |                                       |                | ISO p | 14,2 | 10,4 | 6,2  | 4,5 | 2,8 | 3,1  | 7,4  | 8,9  | 13,7 | 42,0 |
| 27. |                                       |                | ISO u | 27,3 | 18,6 | 10,3 | 7,8 | 8,5 | 10,0 | 18,5 | 23,7 | 32,6 | 29,0 |



Rys. 3.5. Temperatura powietrza w szklarni podczas sezonu grzewczego, wariant 2 oszklenia: a)  $\alpha = 0,2$ ; b)  $\alpha = 0,5$  c)  $\alpha = 0,8$ .

W metodach ISO, zarówno pełnej jak i uproszczonej, zdolność pochłaniania promieniowania przez wewnętrzne powierzchnie obudowy szklarni nie wpływa na jej temperaturę wewnętrzną. Temperatura ta jest wyznaczana jako zależna jedynie od napływu i odpływu ciepła przez transmisję (metoda pełna), albo jako pochodna całkowitych zysków słonecznych przepuszczonych przez oszklenie

i cech termicznych obudowy (metoda uproszczona). Jako skutek tych założeń, metoda pełna zaniża, a metoda uproszczona dość znacznie zawyża temperatury wewnętrzne, co jest szczególnie widoczne w miesiącach wiosenno-jesiennych (rys. 3.5). Wyniki symulacji dynamicznych wykazują wzrost temperatury wewnętrznej wraz ze wzrostem absorpcyjności powierzchni. Temperatura przyjmuje wartości pośrednie pomiędzy wynikami uzyskanymi dla metody pełnej i uproszczonej, które można traktować jako swego rodzaju ograniczenie dolne i górne rzeczywistej temperatury wewnętrznej.

Przebieg średnich temperatur miesięcznych uzyskany w poszczególnych metodach porównano z wynikami symulacji dynamicznych wyznaczając błąd bezwzględny procentowy MAPE (Mean Absolute Percentage Error).

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - S_i}{S_i} \right|, \quad (3.55)$$

gdzie:

$n$  – liczba wielkości prognozowanych,

$P$  – wartość prognozowana (wg PN-EN ISO 13790),

$S$  – wartość dokładna (wg symulacji dynamicznych).

Wartości MAPE wskazują, że różnice pomiędzy wynikami obliczeń i symulacji są znaczne (wg [265],  $MAPE > 15\%$  kwalifikuje prognozy jako niedokładne). Szczególnie duże rozbieżności występują między metodą uproszczoną a symulacjami w wariancie 1 obudowy, o najwyższym stopniu oszklenia. Pominięcie retransmisji promieniowania skutkuje tutaj znaczącym przeszacowaniem temperatury w obszarze balkonu. Można też zaobserwować, że najwyższe temperatury wewnętrzne (wg symulacji dynamicznych) występują w wariancie 2 obudowy, charakteryzującym się najwyższym stosunkiem napływu do odpływu ciepła przez przewodzenie ( $H_{is}/H_{se} = 0,318$ ) i najmniejszą powierzchnią oszklenia. Sugeruje to istotny wpływ izolacyjności cieplnej obudowy na efektywność energetyczną szklarni, przeważający w tym przypadku nad pozyskiwaniem promieniowania słonecznego.

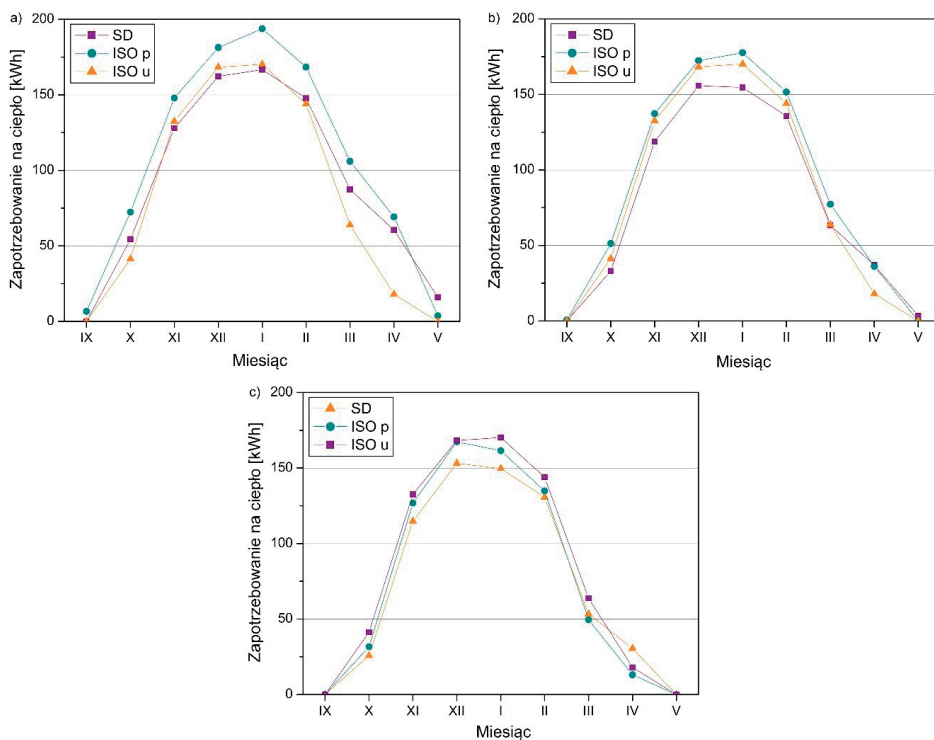
**Tabela 3.4.** Zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniu mieszkalnym podczas sezonu grzewczego. SD – symulacje dynamiczne, ISO p – metoda pełna, ISO u – metoda uproszczona.

| Lp. | Zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniu mieszkalnym [kWh] |                |       |     |      |       |       |       |       |       |      | Suma [kWh] | Zmiana względem SD [%] | MAPE [%] |      |
|-----|-------------------------------------------------------------|----------------|-------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------------|------------------------|----------|------|
|     | Miesiąc                                                     | IX             | X     | XI  | XII  | I     | II    | III   | IV    | V     |      |            |                        |          |      |
| 1.  | Wariant 1                                                   | $\alpha = 0,2$ | SD    | 1,3 | 62,8 | 135,4 | 169,5 | 177,1 | 155,5 | 96,2  | 66,3 | 18,2       | 882,3                  |          |      |
| 2.  |                                                             |                | ISO p | 0,4 | 49,3 | 139,8 | 176,3 | 183,5 | 154,1 | 73,4  | 26,6 | 0,1        | 803,4                  | -8,9     | 32,2 |
| 3.  |                                                             |                | ISO u | 0,0 | 35,1 | 133,0 | 170,6 | 173,9 | 143,4 | 54,0  | 1,6  | 0,0        | 711,6                  | -19,4    | 44,2 |
| 4.  |                                                             | $\alpha = 0,5$ | SD    | 0,0 | 36,0 | 124,5 | 161,4 | 163,7 | 140,7 | 66,8  | 36,0 | 0,4        | 729,4                  |          |      |
| 5.  |                                                             |                | ISO p | 0,0 | 23,3 | 125,0 | 163,9 | 162,5 | 130,9 | 35,9  | 4,5  | 0,0        | 646,1                  | -11,4    | 30,9 |
| 6.  |                                                             |                | ISO u | 0,0 | 35,1 | 133,0 | 170,6 | 173,9 | 143,4 | 54,0  | 1,6  | 0,0        | 711,6                  | -2,4     | 26,4 |
| 7.  |                                                             | $\alpha = 0,8$ | SD    | 0,0 | 22,7 | 117,7 | 156,4 | 155,5 | 131,6 | 49,1  | 24,0 | 0,0        | 657,1                  |          |      |
| 8.  |                                                             |                | ISO p | 0,0 | 7,9  | 110,2 | 151,6 | 141,5 | 107,9 | 12,3  | 0,6  | 0,0        | 531,9                  | -19,0    | 30,4 |
| 9.  |                                                             |                | ISO u | 0,0 | 35,1 | 133,0 | 170,6 | 173,9 | 143,4 | 54,0  | 1,6  | 0,0        | 711,6                  | 8,3      | 22,3 |
| 10. | Wariant 2                                                   | $\alpha = 0,2$ | SD    | 0,0 | 54,4 | 127,9 | 162,3 | 166,7 | 147,8 | 87,4  | 60,5 | 16,0       | 823,0                  |          |      |
| 11. |                                                             |                | ISO p | 6,6 | 72,4 | 147,9 | 181,3 | 193,8 | 168,4 | 106,0 | 69,2 | 3,7        | 949,4                  | 15,4     | 22,6 |
| 12. |                                                             |                | ISO u | 0,0 | 41,3 | 132,5 | 168,3 | 170,2 | 144,0 | 63,8  | 18,0 | 0,0        | 738,1                  | -10,3    | 25,9 |
| 13. |                                                             | $\alpha = 0,5$ | SD    | 0,0 | 33,1 | 118,7 | 155,8 | 154,6 | 135,7 | 63,3  | 36,9 | 3,4        | 701,5                  |          |      |
| 14. |                                                             |                | ISO p | 0,7 | 51,3 | 137,3 | 172,4 | 177,6 | 151,6 | 77,2  | 36,2 | 0,2        | 804,6                  | 14,7     | 25,1 |
| 15. |                                                             |                | ISO u | 0,0 | 41,3 | 132,5 | 168,3 | 170,2 | 144,0 | 63,8  | 18,0 | 0,0        | 738,1                  | 5,2      | 23,6 |
| 16. |                                                             | $\alpha = 0,8$ | SD    | 0,0 | 25,8 | 114,8 | 153,1 | 149,7 | 130,7 | 53,4  | 30,5 | 0,0        | 658,1                  |          |      |
| 17. |                                                             |                | ISO p | 0,1 | 31,7 | 126,8 | 167,4 | 161,4 | 134,9 | 49,6  | 13,1 | 0,0        | 685,0                  | 4,1      | 13,1 |
| 18. |                                                             |                | ISO u | 0,0 | 41,3 | 132,5 | 168,3 | 170,2 | 144,0 | 63,8  | 18,0 | 0,0        | 738,1                  | 12,2     | 18,8 |
| 19. | Wariant 3                                                   | $\alpha = 0,2$ | SD    | 0,4 | 59,5 | 130,8 | 164,6 | 171,4 | 150,4 | 92,3  | 63,9 | 17,1       | 850,4                  |          |      |
| 20. |                                                             |                | ISO p | 8,2 | 78,0 | 153,7 | 187,8 | 203,4 | 176,0 | 113,0 | 73,1 | 3,7        | 996,8                  | 17,2     | 34,8 |
| 21. |                                                             |                | ISO u | 0,0 | 66,8 | 148,2 | 183,2 | 195,6 | 167,4 | 97,6  | 53,2 | 0,0        | 912,0                  | 7,2      | 31,6 |
| 22. |                                                             | $\alpha = 0,5$ | SD    | 0,0 | 42,1 | 124,2 | 159,8 | 163,3 | 141,5 | 74,2  | 43,6 | 6,1        | 754,7                  |          |      |
| 23. |                                                             |                | ISO p | 1,2 | 60,2 | 145,0 | 180,5 | 190,9 | 162,4 | 88,5  | 42,8 | 0,3        | 871,8                  | 15,5     | 24,6 |
| 24. |                                                             |                | ISO u | 0,0 | 66,8 | 148,2 | 183,2 | 195,6 | 167,4 | 97,6  | 53,2 | 0,0        | 912,0                  | 20,8     | 31,6 |
| 25. |                                                             | $\alpha = 0,8$ | SD    | 0,0 | 35,0 | 121,1 | 157,5 | 159,4 | 137,3 | 65,7  | 36,0 | 1,1        | 713,0                  |          |      |
| 26. |                                                             |                | ISO p | 0,2 | 43,0 | 136,2 | 173,2 | 178,5 | 148,7 | 64,5  | 19,1 | 0,0        | 763,4                  | 7,1      | 23,6 |
| 27. |                                                             |                | ISO u | 0,0 | 66,8 | 148,2 | 183,2 | 195,6 | 167,4 | 97,6  | 53,2 | 0,0        | 912,0                  | 27,9     | 41,2 |

Od obu metod ISO nie oczekuje się dokładnego odwzorowania przebiegu zapotrzebowania na ciepło w poszczególnych miesiącach sezonu grzewczego, a jedynie bliskiego bardziej dokładnym obliczeniom wyniku końcowego. Na podstawie wartości MAPE, przebiegu miesięcznego zapotrzebowania na ciepło nie można zaliczyć do prognoz dopuszczalnych ( $10\% < \text{MAPE} \leq 15\%$  wg [265], warunek ten spełnia 1 spośród 18 wyników).

Metody miesięczne ISO w założeniu powinny być metodami „zachowawczymi”, tzn. zawyżającymi sezonowe zapotrzebowanie na ciepło w porównaniu do metod z krokiem godzinowym, przy czym metoda pełna, jako bardziej dokładna, powinna dawać mniejsze zapotrzebowanie na ciepło. Taka prawidłowość widoczna jest jedynie w trzech sytuacjach obliczeniowych – wariant 2,  $\alpha = 0,8$  oraz wariant 3,  $\alpha = 0,5$  i  $0,8$  (rys. 3.6, tabela 3.4). W tych przypadkach różnice pomiędzy metodą

pełną ISO a symulacjami wynoszą od 4% do prawie 16%, a pomiędzy metodą uproszczoną ISO a symulacjami – od 12% do 28%. Przybliżenie tego rzędu, zdaniem autorki, można uznać za satysfakcjonujące w obliczeniach inżynierskich.



**Rys. 3.6.** Zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniu mieszkalnym podczas sezonu grzewczego, wariant 2 oszklenia: a)  $\alpha = 0,2$  b)  $\alpha = 0,5$  c)  $\alpha = 0,8$ .

Wyniki uzyskane dla mniejszych absorpcyjności powierzchni (w wariantach 2 i 3 obudowy) mogą budzić pewne wątpliwości co do prawidłowego odwzorowania procesów fizycznych przez metodę uproszczoną. Jeżeli absorpcyjność powierzchni obudowy szklarni jest mała, metoda uproszczona ISO daje mniejsze zapotrzebowanie na ciepło niż metoda pełna (czy nawet symulacje dynamiczne), co jest skutkiem zawyżenia efektu buforowego przestrzeni słonecznej w związku z pominięciem retransmisji promieniowania.

Modelowanie przestrzeni słonecznych o wysokim stopniu oszklenia (wariant 1) wg normy [241] należy uznać za niezadawalające. Dla dużych powierzchni oszklenia metoda uproszczona istotnie zawyża zyski energetyczne i temperaturę w szklarni, co jest wynikiem pominięcia największej w takich sytuacjach retransmisji promieniowania. Zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło w metodzie

pełnej w porównaniu z symulacjami wydaje się być związane ze specyficzną geometrią szklarni i umieszczeniem oszklenia na jej ścianach bocznych. Pewne ilości promieniowania kierunkowego padającego na oszklenia są tracone na zewnątrz na drodze bezpośredniej retransmisji (po przejściu przez dwie płaszczyzny oszklenia), bez odbicia od przegród pełnych przestrzeni słonecznej – zjawisko to nie jest brane pod uwagę w obliczeniach wg metody ISO, ale jest uwzględnione w symulacjach dynamicznych analizujących rzeczywistą drogę promieni słonecznych – stąd mogą wynikać różnice pomiędzy obiema grupami wyników. Efekt ten jest bardziej widoczny wraz ze wzrostem absorpcyjności powierzchni, na który „nakłada się” zawiązone opromienianie przegród pełnych szklarni.

Podsumowując, metody ISO (po uwzględnieniu modyfikacji zaproponowanych przez autorkę) pozwalają zadowalająco odwzorować funkcjonowanie przykładowej przestrzeni słonecznych o mniejszym udziale przegród oszklonych i większej pochłanianości promieniowania wewnątrz obudowy, czyli przestrzeni zbliżonej pod względem utylizacji promieniowania słonecznego do tradycyjnych pomieszczeń. Zjawiska typowe dla pomieszczeń o wysokim stopniu oszklenia, takie jak retransmisja promieniowania odbitego, nie są wystarczająco dokładnie uwzględnione w metodyce obliczeń normy. Efektem tego są większe rozbieżności między wynikami uzyskanymi dla szklarni oszklonej na wszystkich powierzchniach i dla wysokich odbijalności wnętrza obudowy. Należy też pamiętać, że powyższe analizy zostały przeprowadzone dla określonego rozkładu promieniowania wewnątrz szklarni. Przyjęcie bardziej dokładnego odwzorowania napromieniowania powierzchni mogłoby mieć wpływ na dokładność obliczeń. Szczegółowa analiza drogi promieniowania wykracza jednak poza obszar obliczeń inżynierskich, którym mają służyć metody zawarte w EN ISO 13790.

Pośród przedstawionych metod obliczeniowych symulacje dynamiczne są narzędziem pozwalającym na uwzględnienie największej liczby czynników decydujących o funkcjonowaniu szklarni, czyli przede wszystkim:

- przestrzennego charakteru promieniowania słonecznego,
- właściwości optycznych oszkleń w funkcji kąta padania promieniowania,
- retransmisji promieniowania na skutek odbić w obszarze przestrzeni słonecznej
- zróżnicowanej absorpcyjności powierzchni,
- wentylacji przestrzeni szklarni i przepływu powietrza między szklarnią a pomieszczeniem klimatyzowanym.

Jest to więc metoda o największym potencjale badawczym, pod warunkiem świadomego jej stosowania i, w miarę możliwości, walidacji otrzymanych wyników w warunkach rzeczywistego funkcjonowania badanych obiektów.

## 4. Walidacja programów obliczeniowych

### 4.1. Ogólne zasady walidacji programów symulacyjnych

Od początku rozwoju metod obliczeniowych w fizyce budowli widziano konieczność kontroli uzyskiwanych wyników [172]. Walidacja programu komputerowego jest definiowana jako złożony proces testowania, obejmujący sprawdzenie jego założeń teoretycznych, zastosowań praktycznych i prawidłowości obsługi przez użytkownika [122]. Dzięki porównaniu wyników badań analitycznych lub doświadczalnych z wynikami symulacji możliwe jest nie tylko wyodrębnienie błędów kodu programowego, ale też i zwiększenie doświadczenia i wiarygodności osoby wykonującej modelowanie. Jedną z pierwszych prac na ten temat był raport z badań Solar Energy Research Institute (SERI) w Stanach Zjednoczonych, przedstawiający wszechstronną walidację czterech programów komputerowych (DOE-2.1, BLAST-2MRT, BLAST-3.0, DEROB-3, DEROB-4 i SUNCAT 2.4). Raport ten opracowano w latach 80. ubiegłego wieku, ale doczekał się on pełnego wydania stosunkowo niedawno, bo w 2008 roku [135]. Częściowe wyniki badań publikowane były wcześniej, są to m. in. prace [132, 133, 134, 137].

Walidacja obliczeń numerycznych, pozwalająca na ocenę prawidłowości funkcjonowania danego programu lub algorytmu, poprawności zbudowanego modelu i wyznaczonego rozwiązania, najczęściej jest przeprowadzana na jeden z trzech sposobów [26, 135, 182], jako:

- weryfikacja analityczna,
- analiza porównawcza,
- walidacja empiryczna.

Weryfikacja analityczna polega na porównaniu wyników symulacji z wynikami ścisłego rozwiązania analitycznego danego zagadnienia, co umożliwia wykrycie błędów programu a także jest sprawdzeniem prawidłowego jego użytkowania (tabela 4.1). Najczęściej wykorzystywane w tego rodzaju weryfikacji są modele opisujące niestacjonarne przewodzenie ciepła związane z wymuszeniem termicznym, którego źródłem jest promieniowanie słoneczne [135]. Głównym ograniczeniem metody jest fakt, że nie dla wszystkich problemów badawczych można znaleźć rozwiązanie analityczne. Badania analityczne często pomijają bardziej złożone procesy termiczne i drogi wymiany energii, co zawęża informacje na

temat poprawności funkcjonowania programów jakie w ten sposób uzyskujemy. Na korzyść weryfikacji analitycznej przemawia brak niepewności wynikających z błędów pomiarowych, możliwość prowadzenia badań dla szerokiego zakresu wprowadzanych parametrów oraz niski koszt [131, 135, 182].

Analiza porównawcza polega na porównaniu wyników otrzymanych przy pomocy różnych programów lub różnych metod obliczeń w odniesieniu do jednakowego modelu i danych wejściowych. Badania porównawcze pozwalają na testowanie wielu parametrów i, podobnie jak weryfikacja analityczna, są stosunkowo tanie [135, 140]. Dane wejściowe nie są obarczone błędami pomiarowymi, a użytkownik ma możliwość dowolnego wyboru testowanego obiektu i koncentracji na określonych sposobach przekazywania ciepła. Głównym zarzutem stawianym powyższej metodzie jest brak prawdziwego wzorca porównawczego, odnoszącego się do realnego funkcjonowania obiektu („truth standard”). Z tego względu zalecane jest łączenie analiz porównawczych z walidacjami empirycznymi [135].

W walidacji empirycznej wyniki symulacji porównywane są z wielkościami mierzonymi w rzeczywistym modelu. W przeciwieństwie do weryfikacji analitycznej i porównawczej, walidacja empiryczna nie ogranicza się na ogół do wyizolowanego procesu modelowanego w ograniczonej przestrzeni [221]. Ten sposób postępowania wymaga wykonania znacznie bardziej szczegółowego modelu budynku lub innego obiektu (np. komory badawczej), obejmującego dokładną definicję przegród budowlanych i geometrii pomieszczeń, a także systemów instalacyjnych ogrzewania, chłodzenia i wentylacji oraz zysków wewnętrznych (tabela 4.1).

**Tabela 4.1.** Techniki walidacji. Opracowano na podstawie [131, 135].

| Lp. | Technika walidacji | Zakres                                                 | Zalety                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Wady                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----|--------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | Analityczna        | Sprawdzenie rozwiązania numerycznego                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• brak niepewności danych wejściowych</li> <li>• dokładny wzorzec porównawczy (dla prostego modelu)</li> <li>• możliwość testowania porównawczego wielu parametrów i wyizolowanych mechanizmów wymiany ciepła</li> <li>• niski koszt</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• brak rzeczywistego modelu testowego</li> <li>• ograniczenie do zagadnień dla których istnieje rozwiązanie analityczne</li> <li>• ograniczone możliwości sprawdzenia wzajemnych interakcji między poszczególnymi elementami budynku</li> </ul> |
| 2.  | Porównawcza        | Względne sprawdzenie modelu i rozwiązania numerycznego | <ul style="list-style-type: none"> <li>• brak niepewności danych wejściowych</li> <li>• dowolny poziom złożoności</li> <li>• możliwość testowania porównawczego wielu parametrów</li> <li>• niski koszt</li> </ul>                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• brak wzorca porównawczego</li> </ul>                                                                                                                                                                                                          |



|    |            |                                               |                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                               |
|----|------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3. | Empiryczna | Sprawdzenie modelu i rozwiązania numerycznego | <ul style="list-style-type: none"> <li>• przybliżony wzorzec porównawczy (ograniczony dokładnością pomiaru)</li> <li>• dowolny poziom złożoności</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• niepewność danych wejściowych wynikająca z błędów pomiarowych</li> <li>• wysoki koszt i czasochłonność</li> <li>• ograniczony zakres analiz jest uzasadniony ekonomicznie</li> </ul> |
|----|------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Bardzo ważna w walidacji empirycznej jest znajomość wszystkich dróg wymiany ciepła między obiektem a otoczeniem, gdyż uwzględnienie tych zjawisk w modelu może mieć decydujące znaczenie dla jego dokładności. W badanym okresie konieczne jest także przeprowadzenie szczegółowych pomiarów parametrów klimatycznych wpływających na wymianę ciepła między budynkiem a otoczeniem, czyli przede wszystkim temperatury i wilgotności powietrza, natężenia promieniowania słonecznego, prędkości i kierunku wiatru. Podczas porównania pomiarów z obliczeniami należy wziąć pod uwagę także możliwe błędy pomiarowe.

Ten rodzaj walidacji traktowany jest w literaturze jako najbardziej wiarygodne sprawdzenie prawidłowości obliczeń. Mimo tego walidacja empiryczna ma też i swoje wady. Przede wszystkim dotyczy ona na ogół jednego określonego wariantu obiektu, badanego w danym czasie i określonych warunkach środowiskowych. W rzeczywistości funkcjonowanie obiektu zależy od wielu czynników, których sprawdzenie w warunkach walidacji eksperymentalnej jest najczęściej niemożliwe [221]. Ponadto, znaczącym problemem mogą być trudności z prawidłowym i pełnym odwzorowaniem w modelu wszystkich zjawisk występujących w rzeczywistym układzie, rzutujące na uzyskane wyniki końcowe. Może to wynikać z braku odpowiednich narzędzi w danym programie komputerowym, nieznajomości wszystkich niezbędnych w modelowaniu parametrów lub braku doświadczenia użytkownika [182]. Oprócz tego, budowa stanowisk pomiarowych jest kosztowna i czasochłonna, a możliwości testowania różnorodnych układów – na ogół ograniczone (tabela 4.2).

**Tabela 4.2.** Obiekty wykorzystywane do walidacji eksperymentalnej. Opracowano na podstawie [135].

| Lp. | Rodzaj obiektu, orientacyjna powierzchnia | Zalety                                                                                                                                 | Wady                                                                                                                                                           |
|-----|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | Komora badawcza 10 m <sup>2</sup>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• możliwość dokładnej kontroli systemu</li> <li>• możliwość dokładnego opomiarowania</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• małe wymiary w porównaniu z rzeczywistymi obiektami,</li> <li>• brak niektórych mechanizmów wymiany ciepła</li> </ul> |

| Lp. | Rodzaj obiektu, orientacyjna powierzchnia                | Zalety                                                                                                                                                                                                                                                        | Wady                                                                                                                                                                                           |
|-----|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.  | Budynek mieszkalny (nieużytkowany)<br>100 m <sup>2</sup> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• warunki zbliżone do rzeczywistego funkcjonowania</li> <li>• brak niepewności związanych z modelowaniem zachowania użytkowników</li> <li>• możliwość dokładnej kontroli systemu i dokładnego opomiarowania</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• brak niektórych mechanizmów wymiany ciepła (związanych z obecnością użytkowników)</li> </ul>                                                          |
| 3.  | Budynek mieszkalny (użytkowany)<br>100 m <sup>2</sup>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• warunki rzeczywistego funkcjonowania</li> <li>• wiele mechanizmów wymiany ciepła</li> </ul>                                                                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• niepewności związane z modelowaniem zachowania użytkowników</li> <li>• ograniczone możliwości kontroli systemu i opomiarowania</li> </ul>             |
| 4.  | Budynek użyteczności publicznej<br>200 m <sup>2</sup>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• warunki rzeczywistego funkcjonowania</li> <li>• wiele mechanizmów wymiany ciepła</li> <li>• wiele stref, możliwość analizowania wzajemnych interakcji</li> </ul>                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• duże niepewności związane z modelowaniem zachowania użytkowników</li> <li>• bardzo ograniczone możliwości kontroli systemu i opomiarowania</li> </ul> |

Wiarygodność przeprowadzonej walidacji zależy przede wszystkim od możliwości wyodrębnienia źródeł błędów w symulacji. Błędy te można podzielić na dwie grupy: są to błędy zewnętrzne i wewnętrzne. Błędy zewnętrzne obejmują między innymi [131]:

- błędy w przygotowaniu modelu budynku,
- różnice pomiędzy właściwościami fizycznymi i cieplnymi materiałów założonymi w symulacjach i rzeczywistymi,
- różnice pomiędzy przyjętymi ramami czasowymi, strategiami kontroli i funkcjonowaniem systemów instalacyjnych przyjętymi w modelu a istniejącymi w rzeczywistości,
- różnice pomiędzy przyjętymi ramami czasowymi, strategiami kontroli i zachowaniami użytkowników przyjętymi w modelu a istniejącymi w rzeczywistości,
- różnice pomiędzy lokalnym klimatem bezpośrednio wpływającym na budynek a danymi klimatycznymi użytymi w symulacji.

Do błędów wewnętrznych zalicza się:

- różnice pomiędzy rzeczywistymi mechanizmami wymiany ciepła a ich uproszczonym modelowaniem w symulacjach,
- błędy lub niedokładności rozwiązania numerycznego,
- błędy kodu źródłowego.

Pierwszym etapem walidacji, zgodnie ze [131, 135], powinna być weryfikacja analityczna przeprowadzona na podstawie określonych zagadnień testowych. Pozwala ona ustalić, czy dane mechanizmy transportu ciepła są modelowane w prawidłowy sposób przez program symulacyjny. Drugi krok procesu walidacji to sprawdzenie eksperymentalne na podstawie rzeczywistego modelu. Ostatnim etapem powinno być wykonanie analiz porównawczych z wykorzystaniem programów komputerowych bazujących na różnorodnych metodach obliczeniowych (które pozytywnie przeszły pierwszy i drugi etap walidacji). Błędy wykryte na każdym z etapów powinny być skorygowane przed dalszymi pracami. Jeżeli dany program przejdzie pomyślnie procedury oceny, może być wykorzystywany do testowania innych programów lub uproszczonych metodologii obliczeniowych.

Porównanie wyników symulacji i wielkości odniesienia (wyznaczonych analitycznie lub doświadczalnie) oparte powinno być na statystycznej analizie zgodności obu zestawów danych. Podstawowe metody oceny zgodności wyników wymieniane w literaturze [45, 122, 178, 180, 221, 222, 223] to parametryczna analiza wrażliwości i analiza residuów.

W pierwszej z nich dla przygotowanego modelu przeprowadzane są kolejne symulacje, w których wielkości parametrów wejściowych zmniejsza się lub zwiększa o wartość odchylenia standardowego. Na ich podstawie można ustalić całkowity zakres niepewności wyników modelowania, a zgodność jest dobra jeżeli wyniki pomiarów eksperymentalnych (z uwzględnieniem niepewności pomiarów) leżą w wyznaczonym obszarze. Zaletą metody jest jej przejrzystość, a także możliwość wyodrębnienia kluczowych parametrów wpływających na wyniki modelowania. Niestety odchylenia standardowe poszczególnych parametrów mogą być nieznane lub ustalane na podstawie subiektywnej oceny modelującego, co znacząco wpływa na wiarygodność porównania.

Analiza residuów polega na ocenie różnic pomiędzy wynikami modelowania i pomiarami. Miernikami adekwatności modelu mogą być parametry statystyczne takie jak błąd średni (Mean Bias Error (MBE)), błąd średni kwadratowy (Root Mean Square Error (RMSE)), współczynnik zmienności błędu średniego kwadratowego (Coefficient of Variation of Root Mean Square Error (CvRMSE)) lub błąd bezwzględny procentowy (Mean Absolute Percentage Error (MAPE)).

## 4.2. Rozwój metod walidacyjnych

Prace SERI nad walidacją programów symulacyjnych kontynuowane były przez International Energy Agency (IEA) i Building Research Establishment (BRE) w Anglii. Najważniejsze projekty badawcze z tego zakresu przedstawione są w tabeli 4.3.

**Tabela 4.3.** Ważniejsze projekty międzynarodowe obejmujące badania walidacyjne. Opracowanie własne.

| Lp. | Projekt                                                                                 | Lata realizacji | Opis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Publikacje                                            |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1.  | SERI (NREL)                                                                             | 1980–1983       | Walidacja: analityczna, empiryczna i porównawcza, 4 programy symulacyjne (DOE, BLAST, DEROB, SUNCAT)<br>Obiekty: budynek testowy nieużytkowany i komora badawcza z systemem zysków bezpośrednich (USA)                                                                                                                                                                                  | [132, 133, 134, 135, 137]                             |
| 2.  | IEA SHC <sup>*</sup><br>Zadanie 8<br>„Passive and Hybrid Solar Low Energy Buildings”    | 1982–1988       | Walidacja: empiryczna i porównawcza, 12 programów symulacyjnych (ENCORE, BA4, PASOLE, SOLMAT, SMP, BFEP, KLI/PAS, ESP, BLAST, DOE, SERIRE, DEROB)<br>Obiekty: komory badawcze z systemami pasywnymi zysków bezpośrednich (Kanada), ściany Trombe’a (Szwajcaria) i szklarni (USA)                                                                                                        | [28, 128, 196]                                        |
| 3.  | EU PASSYS<br>„Passive Solar Components and Systems Testing”                             | 1986–1993       | Walidacja: empiryczna, program ESP<br>Obiekty: komory badawcze z systemami zysków bezpośrednich, szklarniowymi, fasadami wentylowanymi i izolacjami transparentnymi (13 lokalizacji na terenie Europy)                                                                                                                                                                                  | [30, 119, 120, 122, 171]                              |
| 4.  | IEA ECBCS <sup>**</sup><br>Aneks 21<br>„Environmental Performance of Buildings”         | 1988–1993       | Walidacja: empiryczna i porównawcza, 17 programów symulacyjnych (3TC, Apache, BLAST, CHEETAH, CLIM 2000, DEROB, DOE2, ENERGY2, ESP, HTB2, S3PAS, SERI-RES, Tas, TASE, TRNSYS, tsbi3, WG6TC)<br>Obiekty: 4 podwójne komory badawcze z systemami zysków bezpośrednich (UK).<br>Podstawy metodologii BESTEST, EN ISO 13792, ASHRAE Standard 140-2001                                       | [131, 171, 172, 173, 175]                             |
| 5.  | IEA SHC <sup>*</sup><br>Zadanie 22<br>„Building Energy Analysis Tools”                  | 1996–2002       | Walidacja: analityczna, empiryczna i porównawcza, 6 programów symulacyjnych (CA-SIS, CLIM 2000, DOE2, EnergyPlus, PROMETHEUS, TRNSYS)<br>Obiekty: budynek z pomieszczeniami testowymi ETNA oraz 7 oddzielnych komór badawczych (Francja), budynek Iowa Energy Resource Station (USA).<br>Szczegółowa walidacja modelowania systemów instalacyjnych<br>Podstawy metodologii HVAC BESTEST | [2, 183, 184, 194, 205, 206, 220, 221, 222, 257, 292] |
| 6.  | IEA ECBCS <sup>**</sup><br>Aneks 41<br>„Whole Building Heat, Air and Moisture Response” | 2003–2007       | Walidacja: analityczna, empiryczna i porównawcza, 13 programów symulacyjnych (BSim, CLIM 2000, DELPHIN, EnergyPlus, ESP-r, HAM, IDA-ICE, NPI, PowerDomus, SPARK, TRNSYS, Wufi, Xam)<br>Obiekty: budynek szeregowy (Niemcy), budynek dwupiętrowy (Belgia), komory badawcze, komory klimatyczne różnej wielkości (Japonia, Kanada)<br>Walidacja z uwzględnieniem przepływu wilgoci        | [102, 157, 260, 264, 308]                             |

|    |                                                                                                                           |           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                    |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 7. | IEA ECBCS**<br>Aneks 42<br>„Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems”                   | 2003–2007 | Walidacja: empiryczna i porównawcza, 4 programy symulacyjne (EnergyPlus, ESP-r, IDA-ICE, TRNSYS)<br>Obiekty: urządzenia prototypowe do mikro-kogeneracji<br>Walidacja modułów modelujących mikro-kogenerację w budynkach mieszkalnych                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | [23, 24, 139]                      |
| 8. | IEA ECB***<br>Aneks 43<br>IEA SHC<br>Zadanie 34<br>„Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools”           | 2003–2007 | Walidacja: analityczna, empiryczna i porównawcza, 19 programów symulacyjnych (BASECALC, BSim, CODYRUN, COMFIE, COMIS, DOE, EES, EnergyPlus, ESP-r, Fluent, HELIOS, HTB2, IDA-ICE, KoZiBu, MATLAB, SUNREL, TRNSYS, VA114, VentSim)<br>Obiekty: komory badawcze EMPA (Szwajcaria), komora badawcza z fasadą podwójną (Dania), budynek Iowa Energy Resource Station (USA)<br>Walidacja modeli dotyczących interakcji między zyskami słonecznymi, zacienianiem i oświetleniem, oraz modeli fasad podwójnych i systemów instalacyjnych<br>Dalszy rozwój metodologii BESTEST (walidacja modeli dotyczących transportu ciepła w gruncie, przepływów wielostrefowych, zacieniania, fasad podwójnych, systemów instalacyjnych) | [69, 136, 138, 176, 204]           |
| 9. | IEA ECB**<br>Aneks 58<br>„Reliable Building Energy Performance Characterization Based on Full Scale Dynamic Measurements” | 2011–2016 | Walidacja: analityczna, empiryczna i porównawcza, 12 programów symulacyjnych (Dynbil, EES, EnergyPlus, eQuest, ESP-r, IESVE, INSEL, IDA-ICE, MATLAB, Modelica, TRNSYS, Wufi)<br>Główne obiekty: budynki wolnostojące (Belgia, Dania, Francja, Hiszpania, Maroko, Niemcy, USA), małowymiarowe komory badawcze funkcjonujące w warunkach rzeczywistych (Belgia, Hiszpania) lub w komorach klimatycznych (Czechy), komory badawcze (Austria, Belgia, Francja, Hiszpania, Niemcy, Norwegia, Włochy)<br>Walidacja programów komputerowych oparta była na wynikach pomiarów z Twin Houses we Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP), Holzkirchen, Niemcy                                                           | [66, 117, 118, 123, 181, 269, 281] |

\* Solar Heating and Cooling Programme

\*\* Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme

\*\*\* Energy in Buildings and Communities Programme (uprzednio ECBCS)

#### 4.2.1. Walidacja doświadczalna

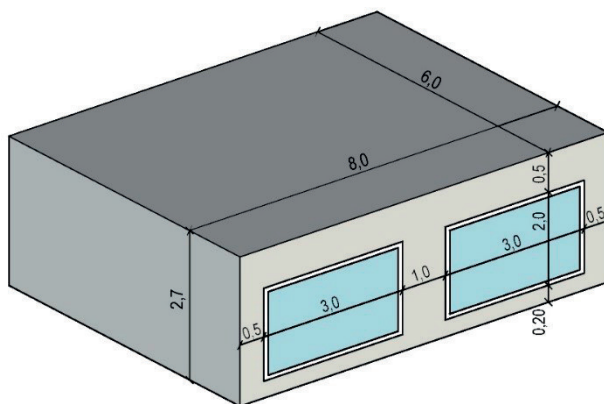
Walidacja doświadczalna ze względu na znaczne koszty i pracochłonność wymaga starannego planowania i przygotowania badań. Przykładowe prace waldacyjne wymienione w tabeli 4.3. obejmowały następujące etapy [281]:

- projektowanie eksperymentu – w pierwszej fazie modelowano obiekt doświadczalny, a wstępne analizy wykonywane w odniesieniu do lokalnego klimatu pozwalały na ustalenie zakresu mierzonych wielkości, przewidywanych temperatur i zysków termicznych, stałej czasowej budynku itp.; na podstawie uzyskanych danych planowano sekwencje pomiarów i określano kluczowe mierzone parametry;
- montaż układu pomiarowego – główne działania to kalibracja i instalacja czujników, montaż i sprawdzenie systemów akwizycji danych oraz programowanie systemów instalacyjnych;
- eksperyment – przeprowadzenie badań i obróbka danych pomiarowych;
- „ślepa walidacja” („blind validation”) – polegająca na przygotowaniu modeli symulacyjnych badanego obiektu przez zespoły zajmujące się poszczególnymi programami komputerowymi; modele były opracowywane na podstawie specyfikacji dotyczących ich konstrukcji, działania systemów instalacyjnych i danych klimatycznych, ale bez znajomości warunków wewnętrznych; etap ten kończył się przygotowaniem raportów dotyczących modelowania i założeń przyjętych przez zespoły badawcze;
- analiza porównawcza – obejmująca porównanie wyników (temperatur wewnętrznych i strumieni ciepła) uzyskanych na podstawie modelowania i pomierzonych w warunkach rzeczywistych; na tym etapie możliwe było wyodrębnienie błędów modelu i ewentualnych błędów pomiarowych;
- powtórne modelowanie – tym razem ze znajomością pomierzonych temperatur wewnętrznych i strumieni ciepła, pozwalające na korektę modeli w zakresie przyjętych założeń lub eliminacji błędów użytkowników; na tym etapie niedozwolona jest kalibracja poszczególnych parametrów wejściowych w celu uzyskania lepszej zgodności z wynikami pomiarów; zabiegi te miały na celu eliminację błędów użytkowników i wyodrębnienie błędów, których źródłem był sam program symulacyjny;
- końcowe analizy i raporty, archiwizacja danych pomiarowych.

#### 4.2.2. Walidacja porównawcza

Przeprowadzenie walidacji doświadczalnej nie zawsze jest możliwe, przede wszystkim ze względu na wysoki koszt tego rodzaju badań. W trakcie wieloletnich prac opisanych na początku punktu 4.2. przygotowano procedury umożliwiające walidację programów komputerowych metodą porównawczą, poprzez zamodelowanie ściśle określonego układu i przeprowadzenie symulacji w oparciu o ustalony zestaw danych klimatycznych. Najbardziej znanym zestawem procedur jest BESTEST (Building Energy Simulation Test), opracowany w ramach Aneksu 21 IEA ECBCS „Environmental Performance of Buildings” [131] i będący podstawą normy ASHRAE 140-2001 [12].

Pierwsze testy BESTEST służą ocenie modelowania wymiany ciepła przez obudowę i przeprowadzane są dla jednostrefowego pomieszczenia testowego o prostej geometrii (prostopadłościan), z dwoma oknami w ścianach zewnętrznych (rys. 4.1). Wytyczne zawierają łącznie 39 testów, zaczynając od podstawowych (14 testów kwalifikacyjnych) do bardziej zaawansowanych (25 testów diagnostycznych), pozwalających na pogłębioną diagnostykę programów. Poszczególne zadania testowe pozwalają ocenić prawidłowość modelowania masy termicznej, oszklenia, zaciniania, orientacji, zysków wewnętrznych, przestrzeni słonecznych, infiltracji, wentylacji nocnej, przewodzenia ciepła do gruntu i nastawy ogrzewania. Wyniki porównywane są z wynikami referencyjnymi, ustalonymi na podstawie symulacji przeprowadzonych przy pomocy wybranych programów testowanych podczas prac Aneksu 21. Numeracja testów rośnie wraz ze wzrostem ich złożoności.



**Rys. 4.1.** Pomieszczenie testowe BESTEST (na rysunku podano wymiary wewnętrzne [m]), wg [131].

Procedury BESTEST zostały rozszerzone o możliwość testowania systemów instalacyjnych (HVAC BESTEST, [205, 206]) podczas realizacji Zadania 22 IEA SHC „Building Energy Analysis Tools”. W szczególności zadania testowe dotyczą modelowania zmiennych w czasie zysków wewnętrznych, różnorodnych strategii kontroli oraz urządzeń grzewczych i chłodniczych, wielostrefowego przenoszenia ciepła. Część testów opartych jest na ścisłych rozwiązaniach analitycznych (14 testów), a część, podobnie jak w pierwszej wersji BESTEST, na wynikach uzyskanych przy pomocy programów referencyjnych (20 testów). Wprowadzono też pewne modyfikacje w pomieszczeniach testowych (zmiana wymiarów, brak okien).

Wśród krajów Unii Europejskiej walidacja porównawcza została objęta normami EN 15265: „Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń z zastosowaniem metod dynamicznych. Kryteria ogólne i procedury walidacji” [238] (mającej status Polskiej Normy) oraz EN ISO 13791 „Ciepłne właściwości użytkowe budynków.



Obliczanie temperatury wewnętrznej pomieszczenia w lecie, bez mechanicznego chłodzenia. Kryteria podstawowe i metody walidacji” [242] i 13792 „Ciepłne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie temperatury wewnętrznej pomieszczenia w lecie, bez mechanicznego chłodzenia. Metody uproszczone” [243]. Normy przeznaczone są do sprawdzenia procedur obliczeniowych w których za krok czasowy przyjmuje się okres mniejszy lub równy godzinie, nie narzucając jednocześnie określonej techniki komputerowej wykonywania obliczeń.

Noma [238] zawiera zestaw założeń, wymagań i badań walidacyjnych stosowanych do obliczania zapotrzebowania na ciepło i chłód w pomieszczeniu. Badania przeprowadzane są dla prostego, jednostrefowego pomieszczenia z pojedynczym oknem w ścianie zewnętrznej, w zadanych warunkach klimatu zewnętrznego. Sprawdzenie obejmuje łącznie 12 testów: 4 początkowe i 8 właściwych badań walidacyjnych, różniących się założeniami dotyczącymi konstrukcji przegród, masy termicznej, zacięcia okien, zysków wewnętrznych i pracy systemów instalacyjnych. Próby wykorzystania normowych metod do walidacji dynamicznych programów symulacyjnych prezentowane są w literaturze przedmiotu w publikacjach [57, 255, 294], a sama metoda opisana jest dokładniej w punkcie 4.3.2.

Normy [242, 243] służą do sprawdzenia poprawności obliczeń temperatury (wewnętrznej i operatywnej) w okresie letnim w pomieszczeniach nie wyposażonych w systemy chłodzenia mechanicznego, wykonywanych z krokiem godzinowym lub krótszym. Testy przeprowadzane są dla pomieszczeń o różnej geometrii i konstrukcji przegród, zabezpieczanych przed nasłonecznieniem systemami zadaszeń i osłon zewnętrznych. Norma [242] podaje warunki brzegowe, początkowe i dane klimatyczne, a sama walidacja dotyczy poszczególnych procesów wymiany ciepła (6 przypadków testowych koncentrujących się na przewodzeniu ciepła przez elementy nieprzezroczyste, wewnętrznej wymianie ciepła przez promieniowanie i modelowaniu nasłonecznienia powierzchni zewnętrznych) i całego modelu (6 przypadków testowych sprawdzających średnie i ekstremalne temperatury operatywne w pomieszczeniach dwóch typów, z oknami pojedynczo lub podwójnie szklanymi). Norma [243] zawiera uproszczone testy oparte na pełnej metodzie walidacji przedstawionej w normie [242]. Walidacja dotyczy całego modelu obliczeniowego (6 przypadków testowych sprawdzających średnie i ekstremalne temperatury operatywne w pomieszczeniach dwóch typów, z oknami podwójnie szklanymi) oraz wyznaczania nasłonecznienia powierzchni zewnętrznych (3 przypadki testowe dla różnych elementów zacięciających). Uproszczenia związane są m. in. z modelowaniem radiacyjnej wymiany ciepła, modelowaniem promieniowania słonecznego i większymi dopuszczalnymi rozbieżnościami między wynikami obliczeń a danymi normowymi.

Poddawane sprawdzeniu metody kalkulacji mogą służyć ocenie ryzyka przegrzewania pomieszczeń, optymalizacji konstrukcji w celu zapewnienia komfortu użytkowania w ciągu lata lub ocenie, czy pomieszczenia wymagają mechanicznego chłodzenia.

### 4.3. Walidacja programu BSim

#### 4.3.1. Walidacja w ramach prac International Energy Agency

Program BSim, który wykorzystano do przeprowadzenia dynamicznych analiz symulacyjnych zawartych w niniejszej pracy, stworzony został przez Danish Building Research Institute i rozwijany we współpracy z Uniwersytetem w Aalborg (Dania). Dokładniejsze informacje na temat zasad i założeń modelowania zawarto w rozdziale 5, natomiast poniższy rozdział koncentrował się będzie na wynikach badań walidacyjnych prezentowanych w literaturze oraz przeprowadzonych przez autorkę.

Pierwsze prace badawcze dotyczące walidacji doświadczalnej programu (pod wcześniejszą nazwą tsbi) były częścią programu IEA ECBCS Aneks 21 „Environmental Performance of Buildings”, a najważniejsze wyniki przedstawiono w pracach [171, 173, 175]. Doświadczalny układ badawczy obejmował cztery podwójne komory o wymiarach 1,51 x 2,35 x 3,11 m każda, zbudowane z lekkich przegród o szkieletowej konstrukcji drewnianej [173]. W jednej ze ścian zewnętrznych osadzone było okno nieprzezroczyste albo pojedynczo lub podwójnie szklone, o wymiarach 1,50 x 1,00 m. Komory ogrzewane były pojedynczymi elektrycznymi grzejnikami olejowymi. Zakres mierzonych wielkości obejmował: temperaturę i wilgotność powietrza zewnętrznego, natężenie promieniowania słonecznego (całkowitego i rozproszonego), kierunek i prędkość wiatru, temperaturę powietrza wewnątrz komór (na trzech wysokościach) i na powierzchniach przegród, zużycie energii elektrycznej na ogrzewanie. Na potrzeby walidacji wykorzystano dwa okresy pomiarowe trwające 10 dni (od 17 do 26 X 1987 i od 21 do 30 V 1990), posługując się odczytami godzinowymi wybranych parametrów. Dla zamodelowanych komór pomiarowych na podstawie symulacji wyznaczano m. in.: natężenie promieniowania słonecznego na ścianie skierowanej na południe, minimalną i maksymalną temperaturę powietrza wewnętrznego i powierzchni przegród, zużycie energii elektrycznej na ogrzewanie (tylko w październiku). Spośród 12 ocenianych parametrów, w przypadku programu tsbi 9 mieściło się w granicach błędu pomiarowego, co było jednym z najlepszych rezultatów wśród ocenianych programów [171]. Walidacja pozwoliła także na zidentyfikowanie i korektę błędów programu, związanych z modelowaniem wysokości horyzontu i natężenia promieniowania słonecznego.

W projekcie badawczym IEA ECBCS Aneks 41 „Whole Building Heat, Air and Moisture Response” program występował już pod nową nazwą BSim [102, 157, 260, 264, 308]. Celem badawczym projektu było porównanie odpowiedzi hygrotermicznej pomieszczeń lub prostych budynków zamodelowanych za pomocą poszczególnych programów, i analiza interakcji między przepływem wilgoci w przegrodach budowlanych a zapotrzebowaniem na energię i tempera-

turą w pomieszczeniach [260]. Programy testowane były na podstawie procedur BESTESTU (walidacja porównawcza i analityczna) lub wyników doświadczalnych pochodzących z komory badawczej w Tohoku University (Japonia), albo z budynku badawczego zlokalizowanego we Fraunhofer Institute of Building Physics w Holzkirchen (Niemcy) i rzeczywistego budynku szeregowego z okolic Leuven (Belgia) [308]. Ze względu na fakt, że program BSim uczestniczył jedynie w wybranych zadaniach projektu, a modelowanie przepływu wilgoci nie jest tematem niniejszej pracy, wyniki badań nie będą tutaj szerzej omawiane.

Ważną częścią walidacji programu były prace będące częścią projektu badawczego IEA ECB Aneks 43 IEA SHC Zadanie 34 „Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools”. Skupiono się wówczas na modelowaniu podwójnej fasady oszklonej, której rzeczywiste funkcjonowanie opomiarowane było na stanowisku badawczym „The Cube” w Aalborg (Dania). Była to komora o wymiarach zewnętrznych 6,00 x 6,00 x 6,00 m, w której mieściły się: komora pomiarowa z podwójną fasadą na pełnej wysokości (odległość między szybami wynosi 0,58 m) i pomieszczenia techniczne. Fasada podzielona była na mniejsze pola i istniała możliwość wentylowania jej przestrzeni dzięki otwarciu pól w dolnej i górnej części [138]. Podczas badań przeprowadzone zostały dwa testy, z fasadą zamkniętą i otwartą w sposób pozwalający na wymianę powietrza ze środowiskiem zewnętrznym. W komorze pomiarowej utrzymywano stałą temperaturę powietrza dzięki systemowi wentylacji mechanicznej. Głównym zadaniem było wyznaczenie temperatury pomiędzy oszkleniami fasady i zysków słonecznych, oraz przepływów powietrza w przypadku fasady wentylowanej. Parametry środowiska zewnętrznego takie jak temperatura i wilgotność względna powietrza, natężenie promieniowania słonecznego (całkowitego i rozproszonego), kierunek i prędkość wiatru, ciśnienie atmosferyczne, temperatura gruntu pod komorą, mierzono w odstępach 10. minutowych w okresach 19 X 2006 – 6 XI 2006 i 1 – 15 X 2006. W samym obiekcie rejestrowano natężenie promieniowania słonecznego na zewnętrznej powierzchni fasady i promieniowania transmitowanego do wewnątrz, temperaturę powietrza w komorze i między oszkleniami fasady, temperaturę przegród pełnych i oszklonych, zużycie energii na ogrzewanie lub chłodzenie powietrza w komorze, przepływy powietrza pomiędzy płaszczyznami fasady. Dodatkowo mierzono także szczelność obiektu i właściwości spektralne przegród oraz wykładziny ułożonej przed fasadą od strony zewnętrznej (w celu uzyskania stałej odbijalności podłoża). Szczegóły badań opisano wyczerpująco w [138]. Wyniki potwierdziły dobre odwzorowanie procesów transportu ciepła w symulacjach, oraz wskazały na pewne niedociągnięcia podczas modelowania rozkładu promieniowania słonecznego w okresach o wysokim nasłonecznieniu. Dzięki pracom walidacyjnym program jest systematycznie udoskonalany i rozwijany [108].

#### 4.3.2. Walidacja własna programu na podstawie pomiarów w komorze badawczej Politechniki Rzeszowskiej

Komory helioenergetyczne Politechniki Rzeszowskiej przeznaczone są do prowadzenia badań nad pasywnymi systemami słonecznymi w rzeczywistych warunkach klimatycznych [154, 167, 168]. Pomiary w komorach rozpoczęto w 2016 roku, a w czasie powstawania niniejszej monografii badania prowadzono w dwóch spośród sześciu obiektów.

Wymiary zewnętrzne komór to około 3,85 x 2,20 x 3,30 m. Ich przegrody zewnętrzne wykonane są w konstrukcji szkieletowej, z kształtowników stalowych zimnogiętych wypełnionych poliuretanową pianką natryskową i obłożonych od zewnątrz płytami warstwowymi z rdzeniem styropianowym (rys. 4.2, tabela 4.4). W przegrodach skierowanych na południe zainstalowane są okna podzielone na sześć pól, z możliwością wymiany oszklenia w poszczególnych segmentach. Do wnętrza komory prowadzą drzwi chłodnicze zamontowane w ścianie północnej. Komory umieszczone są na wysokości około 0,10 m nad gruntem na fundamentach betonowych. Wewnątrz zainstalowane są klimatyzatory, pozwalające na utrzymanie ustalonej temperatury powietrza wewnętrznego.

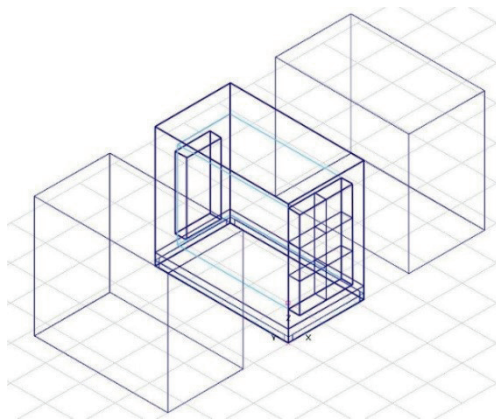


Rys. 4.2. Komory helioenergetyczne Politechniki Rzeszowskiej.

**Tabela 4.4.** Parametry przegród zewnętrznych komór helioenergetycznych.

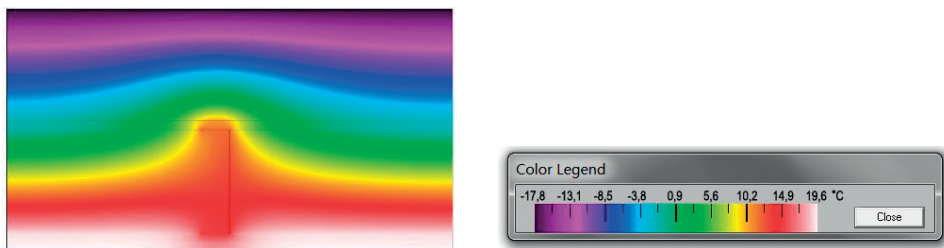
| Lp. | Przegroda         | Opis                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Współczynnik przenikania ciepła U [W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|-----|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1.  | Ściany zewnętrzne | Płyta warstwowa gr. 0,15 m (poszycie stalowe z wypełnieniem styropianem)<br>Płyta OSB 0,012 m<br>Kształtowniki zimnogięte C140/1,25 co 0,60 m z wypełnieniem pianką poliuretanową zamkniętokomórkową<br>Płyta OSB 0,012 m<br>Płyta gipsowo-kartonowa 0,0125 m                                 | 0,151                                                     |
| 2.  | Dach              | Płyta warstwowa gr. 0,15 m (poszycie stalowe z wypełnieniem styropianem)<br>Płyta OSB 0,022 m<br>Kształtowniki zimnogięte C140/1,5 co 0,60 m z wypełnieniem pianką poliuretanową zamkniętokomórkową<br>Pustka powietrzna (sufit podwieszany) 0,00 - 0,20 m<br>Płyta gipsowo-kartonowa 0,025 m | 0,155                                                     |
| 3.  | Podłoga           | Płyta OSB 0,034 m<br>Styropian 0,12 m<br>Płyta OSB 0,022 m<br>Kształtowniki zimnogięte C140/1,5 co 0,60 m z wypełnieniem pianką poliuretanową zamkniętokomórkową<br>Płyta Cetris 0,012 m<br>Styropian 0,05 m                                                                                  | 0,115                                                     |
| 4.  | Okno              | Rama – profile PVC Rehau Geneo PHZ, $U_f = 0,7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$<br>Oszklenie – potrójne, szyby zespolone z powłokami niskoemisyjnymi na szybie wewnętrznej i zewnętrznej, wypełnienie argonem, $U_g = 0,6 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ , $g = 0,50$                             | 0,783                                                     |
| 5.  | Drzwi chłodnicze  | Płat drzwiowy – blacha stalowa powlekana z wypełnieniem z pianki poliuretanowej<br>Ościeżnica – blacha stalowa powlekana                                                                                                                                                                      | 0,400                                                     |

Sama komora jest układem stosunkowo prostym, zamodelowanym w programie BSim jako pojedyncza strefa termiczna (rys. 4.3), o wymiarach odpowiadających wymiarom rzeczywistego obiektu. Odwzorowanie poszczególnych elementów komory nie zawsze było jednak możliwe w sposób ściśle odpowiadający rzeczywistości, co powodowało konieczność stosowania pewnych uproszczeń, opisanych poniżej.



**Rys. 4.3.** Komora helioenergetyczna w programie BSim wraz z sąsiednimi komorami.

Przegrody zewnętrzne obiektu są niejednorodne termicznie ze względu na konstrukcję szkieletową. Program pozwala na budowanie przegród jedynie z warstw jednorodnych, w modelu wprowadzono więc poprawki uwzględniające zwiększenie współczynnika przewodzenia ciepła warstwy zawierającej kształtowniki stalowe. Poprawki te ustalone zostały na podstawie dwuwymiarowej analizy przepływu ciepła przez przegrody zewnętrzne (rys. 4.4), wykonanej przy pomocy programu THERM 6.3 wykorzystującego metodę elementów skończonych [193].



**Rys. 4.4.** Ściana zewnętrzna komory helioenergetycznej z uwzględnieniem niejednorodnej budowy (kształtownik stalowy w części środkowej) – układ izoterm.

Przepływ ciepła przez poszczególne przegrody w symulacjach dynamicznych traktowany jest jako jednokierunkowy, możliwe jest natomiast uwzględnienie efektów zmiany geometrii poprzez wprowadzenie liniowych współczynników przenikania ciepła  $\psi$  przyporządkowanych wybranym krawędziom. Ze względu na małe wymiary komory okazało się, że pominięcie mostków termicznych występujących w narożach czy miejscach osadzenia stolarki nie pozwala odwzorować przebiegu temperatury wewnętrznej z wystarczającą dokładnością. Konieczne było więc wyznaczenie liniowych współczynników przenikania ciepła dla wszystkich



węzłów konstrukcyjnych komory (rys. 4.5). W tym celu również wykorzystano numeryczne analizy przepływu ciepła w programie THERM 6.3, wyznaczając wielkości  $\psi$  w nawiązaniu do wymiarów zewnętrznych komory, zgodnie z normą [239]:

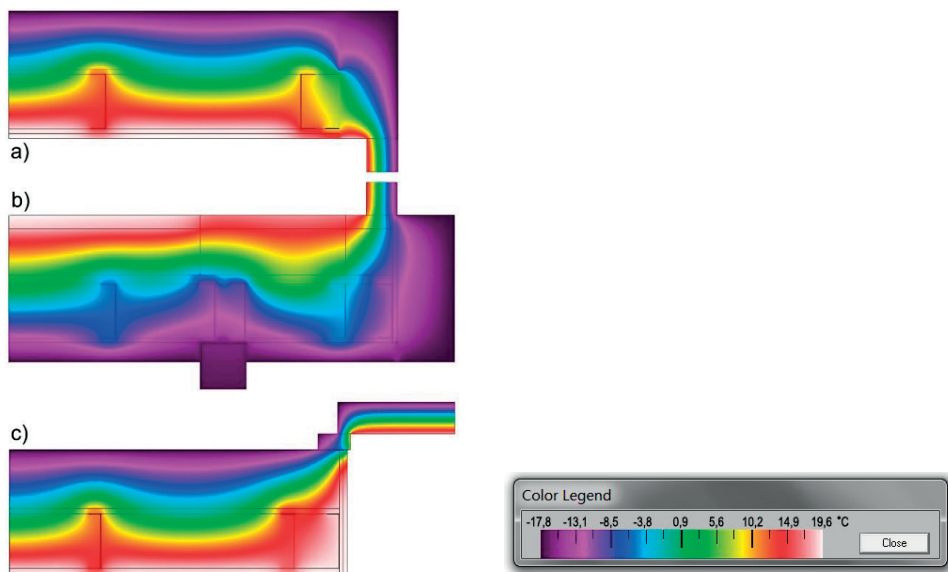
$$\psi = L^{2D} - \sum_{i=1}^j U_i \cdot l_i \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})], \quad (4.1)$$

gdzie:

$L^{2D}$  – współczynnik sprężenia termicznego otrzymany na podstawie dwuwymiarowej analizy numerycznej węzła  $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ,

$U_i$  – współczynnik przenikania ciepła i-tego komponentu węzła  $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ ,

$l_i$  – długość i-tego komponentu  $[\text{m}]$ .



**Rys. 4.5.** Wybrane węzły konstrukcyjne komory helioenergetycznej, układ izoterm: a) ściana i ościeże – przekrój poziomy, b) podłoga i ościeże – przekrój pionowy, c) ściana i osadzenie drzwi – przekrój poziomy.

**Tabela 4.5.** Zestawienie liniowych współczynników przenikania ciepła węzłów konstrukcyjnych komory.

| Lp. | Węzeł                     | Liniowy współczynnik przenikania ciepła $\psi$ ustalony dla wymiarów zewnętrznych komory $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ |
|-----|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | Połączenie ścian          | -0,017                                                                                                                          |
| 2.  | Połączenie ściany i dachu | -0,010                                                                                                                          |



|    |                                        |        |
|----|----------------------------------------|--------|
| 3. | Połączenie ściany i podłogi            | -0,045 |
| 4. | Osadzenie okna – ościeże pionowe       | 0,043  |
| 5. | Osadzenie okna – ościeże poziome dolne | 0,122  |
| 6. | Osadzenie okna – ościeże poziome górne | 0,010  |
| 7. | Osadzenie drzwi                        | 0,351  |

Pewne problemy sprawiało również modelowanie przestrzeni podpodłogowej. W warunkach rzeczywistych jest to pustka między dolną płaszczyzną komory a gruntem o wysokości około 0,10 m. Jest ona otwarta na całym obwodzie, ale przepływ powietrza pod komorą w okresie wiosenno-letnim może być utrudniony ze względu na roślinność częściowo zasłaniającą szczeliny wlotowe. Podczas walidacji wypróbowano trzy możliwości odwzorowania przestrzeni podpodłogowej:

- zakładając, że komora styka się bezpośrednio z powietrzem zewnętrznym,
- traktując ją jako dodatkową warstwę powietrza między komorą a gruntem, o oporze termicznym odpowiadającym niewentylowanej przestrzeni powietrznej wg normy [246],
- przyjmując, że przestrzeń ta stanowi dodatkową strefę termiczną, do której możliwy jest napływ powietrza z zewnątrz przez otwory na obwodzie.

Najlepsze rezultaty osiągnięto dla wersji drugiej, czyli zakładając że strefa ta jest zamkniętą strefą powietrza pomiędzy komorą a gruntem.

Współczynniki przejmowania ciepła na powierzchniach zewnętrznych i wewnętrznych komory przyjęto zgodnie z normą [246]. Program BSim umożliwia wyznaczanie współczynników przejmowania ciepła w sposób dynamiczny w kolejnych krokach czasowych, w powiązaniu z temperaturą powierzchni i powietrza w strefie. Uzyskane w ten sposób wyniki budziły jednak wątpliwości co do poprawnego funkcjonowania danej opcji programu, dlatego też zdecydowano o posługiwaniu się w modelu stałymi wielkościami normowymi.

Na potrzeby walidacji wykorzystano pomiary prowadzone w okresie od 11 V 2016 do 9 VI 2016. W okresie tym w komora nie była klimatyzowana, ale prowadzono w niej rejestrację temperatury powietrza wewnętrznego, temperatury na powierzchni przegród pełnych i oszklonych, a także strumieni ciepła przepływającego przez oszklenie (tabela 4.6). Wielkości rejestrowane były w odstępach 10. minutowych przy pomocy laptopa umieszczonego na stałe w komorze. W tych samych odstępach czasowych prowadzono pomiary następujących parametrów środowiska zewnętrznego: temperatury i wilgotności powietrza zewnętrznego, ciśnienia, kierunku i prędkości wiatru, natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyźnie poziomej.

**Tabela 4.6.** Sprzęt pomiarowy w komorze helioenergetycznej nr 3.

| Lp. | Wielkość mierzona                       | Miernik                                            | Błąd pomiaru                                             |
|-----|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1.  | Temperatura powietrza zewnętrznego      | Stacja meteorologiczna<br>Meteo-multisensor FMA-51 | $\pm 0,3$ K                                              |
| 2.  | Wilgotność względna                     | Stacja meteorologiczna<br>Meteo-multisensor FMA-51 | $\pm 3\%$ RH (0 - 90% RH)<br>$\pm 5\%$ RH (90 - 100% RH) |
| 3.  | Ciśnienie barometryczne                 | Stacja meteorologiczna<br>Meteo-multisensor FMA-51 | $\pm 0,5$ mbara (0 - 30°C)<br>$\pm 1$ mbar (-52 - +60°C) |
| 4.  | Kierunek wiatru                         | Stacja meteorologiczna<br>Meteo-multisensor FMA-51 | $\pm 3^\circ$                                            |
| 5.  | Prędkość wiatru                         | Stacja meteorologiczna<br>Meteo-multisensor FMA-51 | $\pm 3\%$ (0 - 35 m/s)<br>$\pm 5\%$ (36 - 60 m/s)        |
| 6.  | Natężenie promieniowania słonecznego    | Pyranometr gwiazdzisty FLA628S                     | $\pm 7\%$                                                |
| 7.  | Przepływ ciepła, temperatura wewnętrzna | Płyty do pomiaru strumienia ciepła FQ90            | $\pm 5\%$                                                |

Ze względu na fakt, że do przeprowadzenia symulacji niezbędna jest znajomość godzinnych wielkości promieniowania słonecznego kierunkowego i rozproszonego, konieczna była dekompozycja pomierzonego promieniowania całkowitego na dwie składowe. W tym celu posłużono się zależnością między współczynnikiem przejrzystości atmosfery a udziałem promieniowania rozproszonego w widmie słonecznym.

Godzinny współczynnik przejrzystości atmosfery  $k_T$  (clearness index) jest definiowany jako [39, 61, 233, 275]:

$$k_T = \frac{I_h}{I_{h0}} [-], \quad (4.2)$$

gdzie:

$I_h$  – natężenie promieniowania całkowitego na płaszczyźnie poziomej na powierzchni Ziemi [ $\text{W/m}^2$ ],

$I_{h0}$  – natężenie promieniowania całkowitego na płaszczyźnie poziomej poza atmosferą ziemską, równoległej do płaszczyzny położonej na powierzchni Ziemi [ $\text{W/m}^2$ ].

Współczynnik ten jest skorelowany z udziałem, jaki w godzinowym promieniowaniu całkowitym ma część rozproszona. Badania prowadzone z wykorzystaniem danych klimatycznych pochodzących z różnych lokalizacji (m. in. w Kanadzie, Stanach Zjednoczonych, Australii i Europie) wykazały, że zależności korelacyjne są prawie identyczne, niezależnie od szerokości geograficznych [65, 217, 258]. W niniejszej pracy posłużono się zależnościami zaproponowanymi przez Erbsa i współautorów [65], na które powołuje się norma [244]:

$$\frac{I_{hd}}{I_h} = 1,0 - 0,09k_T \quad \text{dla } k_T \leq 0,22, \quad (4.3)$$

$$\frac{I_{hd}}{I_h} = 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4 \quad \text{dla } 0,22 < k_T \leq 0,80,$$

$$\frac{I_{hd}}{I_h} = 0,165 \quad \text{dla } k_T > 0,80, \quad (4.4)$$

gdzie:

$I_{hd}$  – natężenie promieniowania rozproszonego na płaszczyźnie poziomej na powierzchni Ziemi [ $W/m^2$ ].

Natężenie promieniowania słonecznego poza atmosferą ziemską wyznaczono z zależności teoretycznych podanych m.in. przez [39, 65, 217]:

$$I_{h0} = G_{sc} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \cdot (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta), \quad (4.5)$$

gdzie:

$G_{sc}$  – stała słoneczna, przyjęta wg [65] jako  $1367 W/m^2$ ,

$n$  – kolejny dzień roku,

$\phi$  – szerokość geograficzna [stopnie],

$\delta$  – deklinacja Słońca [stopnie]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right), \quad (4.6)$$

$\omega$  – kąt godzinny Słońca (ujemny przed południem i dodatni po południu) [stopnie].

Czas słoneczny potrzebny do wyznaczenia kątów godzinnych obliczono z uwzględnieniem poprawki  $E_t$ , związanej z zaburzeniami ruchu obrotowego Ziemi wokół Słońca, jako [39, 65, 217]:

$$\text{Czas słoneczny} = \text{Czas obowiązujący} + 4 \cdot (L_{st} - L_{lok}) + E_t, \quad (4.7)$$

gdzie:

$L_{st}$  – długość geograficzna dla której ustalany jest czas urzędowy (w Polsce jest to południk  $15^\circ E$  dla czasu zimowego),

$L_{lok}$  – długość geograficzna dla rozpatrywanej lokalizacji (mierzone jako dodatnie w kierunku zachodnim),

$$E_t = 229,2 \cdot (0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B + -0,04089 \sin 2B), \quad (4.8)$$

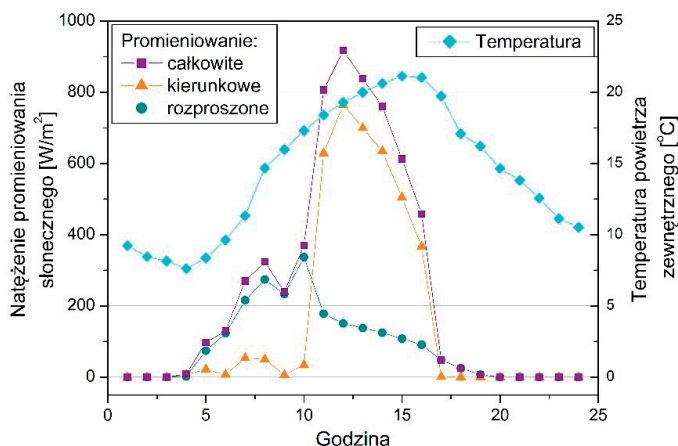
$$B = (n-1) \cdot \frac{360}{365} . \quad (4.9)$$

Zgodnie z zaleceniami podanymi w [217], w Polsce dla czasu letniego należy od czasu obowiązującego odjąć 1 godzinę.

Znając składową rozproszoną promieniowania na płaszczyźnie poziomej, część kierunkową  $I_{hb}$  (docierającą do powierzchni w postaci wiązki z kierunku tarczy słonecznej) można obliczyć jako:

$$I_{hb} = I_h - I_{hd} . \quad (4.10)$$

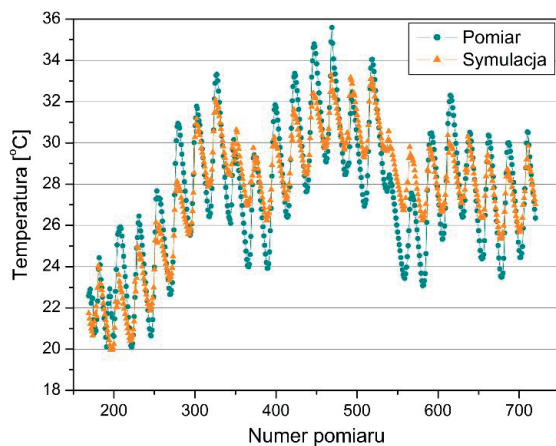
Przykładowe wyniki rozdziału promieniowania prezentuje rysunek 4.6.



Rys. 4.6. Natężenie promieniowania słonecznego na płaszczyźnie poziomej (po dekompozycji) i temperatura powietrza zewnętrznego w dniu 11 V 2016.

Składową promieniowania rozproszonego docierającego do płaszczyzn pionowych wyznaczono w programie BSim przy pomocy modelu anizotropowego Pereza, uwzględniającego niejednorodność tego promieniowania w obszarze okołosłonecznym i nad horyzontem. Prowadzone w Polsce badania wskazują model Pereza jako jeden z najlepszych, ze względu na dużą zgodność z wynikami pomiarów i małe błędy statystyczne [307].

W procesie walidacji porównano temperaturę powietrza otrzymaną z modelu komputerowego z temperaturą pomierzoną w komorze (rys. 4.7). W okresie badań temperatura wewnętrzna podlegała jedynie naturalnym zmianom na skutek oddziaływania środowiska zewnętrznego. W dalszych analizach pominięto pierwszy tydzień symulacji (od 11 do 17 V 2016), co pozwoliło w pełni uwzględnić wpływ pojemności cieplnej na przebieg temperatury.



**Rys. 4.7.** *Temperatury pomierzone w komorze i wyznaczone przy pomocy symulacji, okres od 18 V 2016 do 9 VI 2016.*

Na podstawie pomiarów i symulacji wyznaczono następujące parametry statystyczne [67, 101, 268] (tabela 4.7):

- błąd średni obciążenia (MBE)

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)}{\sum_{i=1}^n M_i} \cdot 100\%, \quad (4.11)$$

- błąd średni kwadratowy (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}}, \quad (4.12)$$

- współczynnik zmienności błędu średniego kwadratowego (Cv(RMSE))

$$Cv(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}}}{\bar{M}} \cdot 100\%, \quad (4.13)$$

- błąd bezwzględny procentowy (MAPE)

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{S_i - M_i}{M_i} \right|}{n} \cdot 100\%, \quad (4.14)$$

gdzie:

M – wartość zmierzona,

$\bar{M}$  – średnia wartość zmierzona,  
 $S$  – wartość wyznaczona na podstawie symulacji,  
 $n$  – liczba obserwacji.

**Tabela 4.7.** Zestawienie parametrów statystycznych dla okresu 18 V 2016 – 09 VI 2016.

| Lp. | MBE [%] | RMSE [°C] | CV(RMSE) [%] | MAPE [%] |
|-----|---------|-----------|--------------|----------|
| 1.  | 0,57    | 1,44      | 5,22         | 4,38     |

W literaturze (według wiedzy autorki) brakuje jednoznacznie określonych kryteriów, które pozwoliłyby na pozytywną lub negatywną ocenę walidowanego modelu lub programu. Są pewne zalecenia sformułowane dla modeli podlegających kalibracji, czyli dopasowaniu wybranych parametrów wejściowych, tak aby końcowy wynik symulacji mógł zostać uznany za zgodny z pomiarami. Zalecenia te przedstawione są w opracowaniach [10, 113, 187] dotyczących oceny zapotrzebowania na energię w budynkach (tabela 4.8).

**Tabela 4.8.** Kryteria kalibracji modeli wykorzystujących dane godzinowe. Opracowano na podstawie [10, 113, 187].

| Lp. | Wskaźnik statystyczny | Dokument       |             |            |
|-----|-----------------------|----------------|-------------|------------|
|     |                       | ASHRAE 14 [10] | IPMVP [113] | FEMP [187] |
| 1.  | MBE [%]               | $\pm 10$       | $\pm 5$     | $\pm 10$   |
| 2.  | Cv(RMSE) [%]          | 30             | 20          | 30         |

Posiłkując się powyższymi kryteriami można ocenić przedstawiony model pozytywnie. Ponadto wielkość MAPE nie przekracza 5%, co według [265] pozwala ocenić model jako dobry.

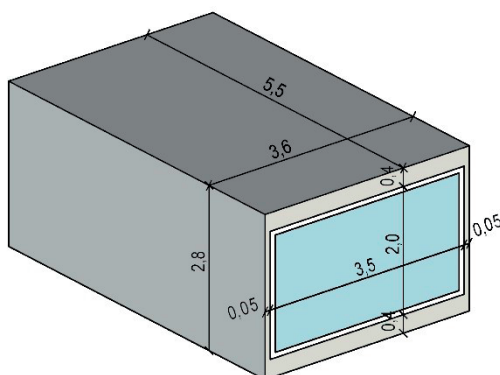
#### 4.3.3. Walidacja własna na podstawie normy PN-EN ISO 15265

Ocena systemów pasywnych zawarta w rozdziale 6 opierać się będzie na wyznaczeniu zapotrzebowania na ciepło i chłód w ciągu roku, dlatego też w ramach badań wstępnych przeprowadzono walidację na podstawie normy PN-EN ISO 15265 „Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń z zastosowaniem metod dynamicznych. Kryteria ogólne i procedury walidacji” [238], gdzie jako kryterium sprawdzające przyjęte jest zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia w pomieszczeniu. Walidacji podlegają procedury obliczeń uwzględniające (cyt. za [238]):

- bilans cieplny powierzchni zewnętrznych,

- pojemności cieplne konstrukcji zewnętrznych i wewnętrznych,
- bilans cieplny powierzchni wewnętrznych,
- bilans cieplny powietrza.

Pomieszczenie testowe przedstawiono na rysunku 4.8, a jego przegrody opisano w tabeli 4.9. W ścianie zewnętrznej skierowanej na zachód znajduje się okno oszklone szybą podwójną o powierzchni 7,00 m<sup>2</sup>. Warunki klimatyczne w ciągu roku charakteryzowane są przez godzinowe wartości temperatury powietrza zewnętrznego i natężenia promieniowania słonecznego kierunkowego na płaszczyźnie normalnej i rozproszonego na płaszczyźnie poziomej.



**Rys. 4.8.** Pomieszczenie testowe (na rysunku podano wymiary wewnętrzne [m]), wg [177].

**Tabela 4.9.** Przegrody pomieszczenia testowego, wg [238].

| Lp. | Przegroda                         | Opis                                                                                                                                                                              | Współczynnik przenikania ciepła U [W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|-----|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1.  | Typ 1 (ściana zewnętrzna)         | Warstwa zewnętrzna gr. 0,115 m<br>Warstwa izolacji gr. 0,060 m<br>Mur gr. 0,175 m<br>Tynk wewnętrzny gr. 0,015 m                                                                  | 0,373                                                     |
| 2.  | Typ 2 (ściana wewnętrzna)         | Tynk gipsowy gr. 0,012 m<br>Wełna mineralna gr. 0,100 m<br>Tynk gipsowy gr. 0,012 m                                                                                               | 0,265                                                     |
| 3.  | Typ 3c lub 3f (sufit lub podłoga) | Pokrycie plastikowe gr. 0,004 m<br>Gładź cementowa gr. 0,060 m<br>Wełna mineralna gr. 0,040 m<br>Beton gr. 0,180 m                                                                | 0,474 (sufit)<br>0,299 (podłoga)                          |
| 4.  | Typ 4c lub 4f (sufit lub podłoga) | Pokrycie plastikowe gr. 0,004 m<br>Gładź cementowa gr. 0,060 m<br>Wełna mineralna gr. 0,040 m<br>Beton gr. 0,180 m<br>Wełna mineralna gr. 0,100 m<br>Płyta akustyczna gr. 0,020 m | 0,202 (sufit)<br>0,162 (podłoga)                          |



| Lp. | Przegroda    | Opis                                                                          | Współczynnik przenikania ciepła U [W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|-----|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 5.  | Typ 5 (dach) | Pokrycie gr. 0,004 m<br>Izolacja gr. 0,080 m<br>Beton gr. 0,200 m             | 0,366                                                     |
| 6.  | Okno         | Szyba podwójna bez zacięcia, g = 0,77<br>Szyba podwójna z zacięciem, g = 0,20 | 2,930 (oszklenie)<br>2,370 (oszklenie)                    |

Dokładny opis materiałów, zawierający współczynniki przewodzenia ciepła i pojemności cieplne oraz właściwości optyczne oszklenia zawarty jest w [238]. Norma podaje również szczegółowo wielkości powierzchniowych współczynników przenoszenia ciepła przez konwekcję i promieniowanie na poszczególnych powierzchniach przegród. W pomieszczeniu przyjmuje się zyski wewnętrzne równe 20 W/m<sup>2</sup>, jedną wymianę powietrza na godzinę oraz nastawy temperatury dla trybu ogrzewania i chłodzenia wynoszące odpowiednio 20°C i 26°C.

Badania walidacyjne obejmują 4 badania początkowe i 8 właściwych, przeprowadzane przy założeniu różnej pojemności cieplnej pomieszczenia, różnych zysków wewnętrznych i możliwości zacięcia lub odsłaniania okna (tabela 4.10). Badania początkowe nie są obowiązkowe, ale można je zastosować w celu wstępnego sprawdzenia metody obliczeniowej.

**Tabela 4.10.** *Badania testowe, wg [238].*

| Lp. | Ściana zewnętrzna | Oszklenie     | Sufit / Dach | Podłoga | Ogrzewanie i chłodzenie | Uwagi                     |
|-----|-------------------|---------------|--------------|---------|-------------------------|---------------------------|
| 1.  | Typ 1             | Zacienione    | Typ 4c       | Typ 4f  | Ciągłe                  | Zyski wewnętrzne          |
| 2.  | Typ 1             | Zacienione    | Typ 3c       | Typ 3f  | Ciągłe                  | Zmiana bezwładności       |
| 3.  | Typ 1             | Zacienione    | Typ 4c       | Typ 4f  | Ciągłe                  | Brak wewnętrznych zysków  |
| 4.  | Typ 1             | Niezacienione | Typ 4c       | Typ 4f  | Ciągłe                  | Brak osłony przed słońcem |
| 5.  | Typ 1             | Zacienione    | Typ 4c       | Typ 4f  | Przerywane              | Zyski wewnętrzne          |
| 6.  | Typ 1             | Zacienione    | Typ 3c       | Typ 3f  | Przerywane              | Zmiana bezwładności       |
| 7.  | Typ 1             | Zacienione    | Typ 4c       | Typ 4f  | Przerywane              | Brak wewnętrznych zysków  |
| 8.  | Typ 1             | Niezacienione | Typ 4c       | Typ 4f  | Przerywane              | Brak osłony przed słońcem |

|     |       |               |        |        |            |                           |
|-----|-------|---------------|--------|--------|------------|---------------------------|
| 9.  | Typ 1 | Zacienione    | Typ 5  | Typ 4f | Przerywane | Zyski wewnętrzne          |
| 10. | Typ 1 | Zacienione    | Typ 4c | Typ 3f | Przerywane | Zmiana bezwładności       |
| 11. | Typ 1 | Zacienione    | Typ 5  | Typ 4f | Przerywane | Brak wewnętrznych zysków  |
| 12. | Typ 1 | Niezacienione | Typ 5  | Typ 4f | Przerywane | Brak osłony przed słońcem |

Wyniki, czyli zapotrzebowanie na ciepło  $Q_H$  i chłód  $Q_C$ , porównywane są z wartościami referencyjnymi  $Q_{H,ref}$  i  $Q_{C,ref}$  (przedstawionymi w tabeli 4.12). W zależności od różnic pomiędzy wielkościami wyznaczonymi a referencyjnymi metoda obliczeń może być zakwalifikowana jako metoda na poziomie dokładności A, B lub C, w których błąd bezwzględny wynosi odpowiednio 5%, 10% lub 15% [238]:

$$r_{QH} = \frac{|Q_H - Q_{H,ref}|}{Q_{tot,ref}}, \quad (4.15)$$

$$r_{QC} = \frac{|Q_C - Q_{C,ref}|}{Q_{tot,ref}}, \quad (4.16)$$

- dla poziomu A:  $r_{QH} \leq 0,05$  i  $r_{QC} \leq 0,05$ ,
- dla poziomu B:  $r_{QH} \leq 0,10$  i  $r_{QC} \leq 0,10$ ,
- dla poziomu C:  $r_{QH} \leq 0,15$  i  $r_{QC} \leq 0,15$ .

Mimo szczegółowo zdefiniowanych przegród i pracy systemów instalacyjnych, dane zawarte w normie zawierają pewne luki. Brakuje m. in. informacji dotyczących szczegółowych wymiarów okna, rodzaju ram okiennych, odbijalności gruntu, czy sposobu wyznaczania natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyznę pionową. Załącznik do normy [238] podaje wielkości promieniowania kierunkowego padającego na płaszczyznę normalną i promieniowania rozproszonego na płaszczyźnie poziomej, a także natężenie promieniowania całkowitego na płaszczyźnie pionowej skierowanej na zachód (w której zlokalizowane jest okno). Nie jest jednak określone, czy wielkości promieniowania padającego na tę płaszczyznę pochodzą z pomiarów, czy były wyznaczone analitycznie (ani też jakiego rodzaju modele matematyczne wykorzystano w tym celu). Ze względu na to, że w programie BSim jest możliwość obliczania na kilka sposobów natężenia promieniowania słonecznego docierającego do płaszczyzn pionowych, w pierwszym etapie walidacji porównano wyniki uzyskane dzięki zastosowaniu poszczególnych modeli z danymi normowymi.

Natężenie promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę nachyloną  $I_\beta$  jest sumą promieniowania kierunkowego  $I_{\beta b}$  (docierającego bezpośrednio od tarczy słonecznej) i rozproszonego, pochodzącego z nieboskłonu  $I_{\beta d}$  i odbitego od powierzchni gruntu  $I_{\beta r}$  [39, 61]:

$$I_\beta = I_{\beta b} + I_{\beta d} + I_{\beta r}. \quad (4.17)$$

Znając natężenie promieniowania kierunkowego na płaszczyźnie poziomej i zależności geometryczne opisujące położenie słońca, składową kierunkową promieniowania na płaszczyźnie nachylonej pod kątem  $\beta$  można obliczyć wykorzystując metodę Hottela-Woertza [39, 106, 217, 258]:

$$I_{\beta b} = I_{hb} \frac{\cos(v)}{\cos(v_z)}, \quad (4.18)$$

gdzie:

$I_{\beta b}$  – natężenie promieniowania kierunkowego padającego na płaszczyznę nachyloną pod kątem  $\beta$  do poziomu [ $W/m^2$ ],

$I_{hb}$  – natężenie promieniowania kierunkowego padającego na płaszczyznę poziomą [ $W/m^2$ ],

$v$  – kąt padania promieniowania kierunkowego na płaszczyznę nachyloną (mierzony względem normalnej do tej płaszczyzny),

$v_z$  – kąt padania promieniowania kierunkowego na płaszczyznę poziomą (mierzony względem normalnej do tej płaszczyzny).

Promieniowanie rozproszone docierające do płaszczyzny nachylonej z powierzchni nieboskłonu jest trudniejsze do wyznaczenia, ze względu na jego anizotropowy charakter. Jeżeli niebo jest bezchmurne, natężenie promieniowania rozproszonego jest większe wokół tarczy słonecznej i nad horyzontem. Im większe zachmurzenie, tym bardziej rozkład natężenia promieniowania rozproszonego zbliża się do równomiernego na całej powierzchni nieba.

Pierwsze historycznie modele obliczania natężenia promieniowania rozproszonego docierającego do płaszczyzny nachylonej to modele izotropowe, zakładające jego równomierny rozkład na całej powierzchni nieboskłonu. Najbardziej znany w tej grupie jest model Liu i Jordana [170] z lat 60. ubiegłego wieku, wg którego natężenie promieniowania rozproszonego oblicza się jako:

$$I_{\beta d} = I_{hd} \frac{1 + \cos\beta}{2}, \quad (4.19)$$

gdzie:

$I_{\beta d}$  – natężenie promieniowania rozproszonego padającego na płaszczyznę nachyloną pod kątem  $\beta$  do poziomu [ $W/m^2$ ],

$I_{hd}$  – natężenie promieniowania rozproszonego padającego na płaszczyznę poziomą [ $W/m^2$ ].

Na bazie modeli izotropowych w latach 70. i 80. powstał szereg modeli pseudo-izotropowych, wprowadzających do równań niewielkie korekty matematyczne, zwiększające dokładność obliczeń. Do tej grupy zaliczyć można modele Haya [96], Kluchera [146], oraz Tempa – Coulsona [286]. Trzecia grupa modeli to modele anizotropowe, uwzględniające niejednorodność promieniowania poprzez wyodrębnienie i dokładne obliczeniowe odwzorowanie dwóch lub trzech jego składowych (promieniowanie okołosłoneczne, nad horyzontem i pochodzące z pozostałej części nieboskłonu). Najbardziej rozpowszechnione spośród modeli anizotropowych są modele Gueymarda [89], Muneera [198, 199] i Pereza [229, 230, 231].

W programie BSim składową promieniowania rozproszonego docierającego do płaszczyzn nachylonych można wyznaczyć m. in. przy pomocy modelu izotropowego Lunda oraz modeli anizotropowych Muneera i Pereza. Poniżej przedstawiono podstawowe ich założenia.

Model Lunda traktuje warunki rzeczywiste jako superpozycję stanu nieba całkowicie zachmurzonego i nieba bezchmurnego, opierając się na następujących zależnościach [177]:

$$I_{\beta d} = \frac{f_{oc} \cdot 1,5N + f_{cl}(8 - N)}{0,5N + 8} I_{hd}, \quad (4.20)$$

gdzie:

$f_{oc}$  – współczynnik uwzględniający udział promieniowania pochodzącego od nieboskłonu całkowicie zachmurzonego,

$f_{cl}$  – współczynnik uwzględniający udział promieniowania pochodzącego od nieboskłonu bezchmurnego,

$N$  – stopień zachmurzenia (od 0 do 8, gdzie 0 oznacza niebo bezchmurne, a 8 – całkowicie zachmurzone).

Współczynniki  $f_{oc}$  i  $f_{cl}$  ustalane są na podstawie zależności empirycznych, podanych w funkcji kąta  $\nu$ , będącego kątem padania promieniowania kierunkowego na płaszczyznę nachyloną (mierzonego względem normalnej do tej płaszczyzny).

Jeżeli  $\cos(\nu) < 0$ :

$$f_{oc} = \left( 0,42 + 0,6 \cdot \cos(\nu) \frac{8 - N}{8} \right) \cdot (1 - \cos\beta) + \cos\beta, \quad (4.21)$$

$$f_{cl} = (0,65 + 0,1 \cdot \cos(\nu)) \cdot (1 - \cos\beta) + \cos\beta, \quad (4.22)$$

jeżeli  $\cos(\nu) \geq 0$ :

$$f_{oc} = 0,42 \cdot (1 - \cos\beta) + \cos\beta, \quad (4.23)$$

$$f_{cl} = (0,65 + 0,2 \cdot \cos(\nu) + 0,45 \cos^2(\nu)) \cdot (1 - \cos\beta) + \cos\beta. \quad (4.24)$$

Model Muneera dzieli płaszczyzny na oświetlone bezpośrednio i zacienione. W przypadku płaszczyzn zacienionych i płaszczyzn oświetlonych w warunkach nieba zachmurzonego, zasadnicze równanie ma postać [199]:

$$I_{\beta d} = I_{hd} \left[ \cos^2 \frac{\beta}{2} + \frac{2b}{\pi(3+2b)} \cdot \left( \sin\beta - \beta \cos\beta - \pi \sin^2 \frac{\beta}{2} \right) \right], \quad (4.25)$$

a w przypadku płaszczyzn oświetlonych bezpośrednio w warunkach nieba bezchmurnego:

$$I_{\beta d} = I_{hd} \left[ \cos^2 \frac{\beta}{2} + \frac{2b}{\pi(3+2b)} \cdot \left( \sin\beta - \beta \cos\beta - \pi \sin^2 \frac{\beta}{2} \right) \right] \cdot (1-F) + I_{hd} \cdot F \frac{\cos(v)}{\cos(v_z)}, \quad (4.26)$$

gdzie:

b – współczynnik przyjmujący wielkość stałą (równą 2,5) w równaniu (4.20), a w równaniu (4.21) obliczany jako:

$$\frac{2b}{\pi(3+2b)} = 0,04 - 0,82F - 2,026F^2, \quad (4.27)$$

F – współczynnik anizotropowości niebosłonu (sky clarity index):

$$F = \frac{I_{hb}}{I_{h0}}, \quad (4.28)$$

$I_{hb}$  – natężenie promieniowania kierunkowego na płaszczyznę poziomą [ $W/m^2$ ],

$I_{h0}$  – natężenie promieniowania poza atmosferą ziemską na płaszczyznę równoległą do rozważanej płaszczyzny poziomej [ $W/m^2$ ].

Pierwsze wersje modelu Pereza prezentowane były w publikacjach [230, 231]. W niniejszej pracy przedstawiono ostatnią jego wersję, opracowaną przez autora i przedstawioną w [229]. W celu wyznaczenia natężenia promieniowania rozproszonego na płaszczyźnie nachylonej do poziomu pod dowolnym kątem  $\beta$  posługuje się on następującą zależnością:

$$I_{\beta d} = I_{hd} \cdot \left[ (1-F_1) \frac{1+\cos\beta}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin\beta \right], \quad (4.29)$$

gdzie:

$I_{\beta d}$  – natężenie promieniowania rozproszonego padającego na płaszczyznę nachyloną pod kątem  $\beta$  [ $W/m^2$ ],

$I_{hd}$  – natężenie promieniowania rozproszonego padającego na płaszczyznę poziomą [ $W/m^2$ ],

a, b – współczynniki uwzględniające kąt padania promieniowania rozproszonego z obszaru okołosłonecznego na płaszczyznę nachyloną i poziomą:

$$a = \max(0; \cos\theta), \quad (4.30)$$

$$b = \max(0,087; \cos Z), \quad (4.31)$$

Z – kąt zenitalny Słońca,

$F_1, F_2$  – współczynniki jasności niebosłonu w obszarze okołosłonecznym i nad horyzontem, zależne od kąta zenitalnego (Z), przejrzystości (sky clearness  $\varepsilon$ ) i jasności (sky brightness  $\Delta$ ) atmosfery:

$$F_1 = F_{11} + F_{12} \cdot \Delta + F_{13} \cdot Z, \quad (4.32)$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22} \cdot \Delta + F_{23} \cdot Z, \quad (4.33)$$

$$\Delta = \frac{I_{hd} \cdot m}{I_{n0}}, \quad (4.34)$$

$$\varepsilon = \left( \frac{I_{hd} + I_{nb}}{I_{hd}} + \kappa \cdot Z^3 \right) / (1 + \kappa \cdot Z^3), \quad (4.35)$$

m – masa optyczna atmosfery, dla kątów zenitalnych od 0° do 70°:

$$m = \frac{1}{\cos Z}, \quad (4.36)$$

$I_{n0}$  – natężenie promieniowania poza atmosferą ziemską na płaszczyznę normalną [W/m<sup>2</sup>],

$I_{nb}$  – natężenie promieniowania kierunkowego na płaszczyznę normalną [W/m<sup>2</sup>],

$\kappa$  – stała równa 1,041 dla Z mierzonego w radianach.

Współczynniki  $F_{11}$  do  $F_{23}$  dla poszczególnych zakresów przejrzystości atmosfery podane są w pracy [188].

Promieniowanie  $I_{\beta r}$  odbite od powierzchni otaczającej płaszczyznę traktowane jest jako izotropowe promieniowanie rozproszone, wyznaczane ze wzoru [39, 106, 217, 258]:

$$I_{\beta r} = (I_{hb} + I_{hd}) \cdot \rho_g \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2}, \quad (4.37)$$

gdzie:

$\rho_g$  – odbijalność powierzchni otaczającej [-].

Roczny przebieg natężenia promieniowania słonecznego docierającego do płaszczyzny pionowej skierowanej na zachód wyznaczony przy pomocy modeli Lunda, Muneera i Pereza (dla odbijalności gruntu 0,2) porównano z wielkościami podanymi w normie [238]. Wyniki poddano ocenie statystycznej, obliczając średni błąd względny (MBE), średni błąd kwadratowy (RMSE), średni błąd bezwzględny procentowy (MAPE) i współczynnik korelacji (tabela 4.11).

**Tabela 4.11.** Porównanie natężenia promieniowania na płaszczyznę pionową z wielkościami, wg [238].

| Lp. | Model   | MBE [%] | RMSE [W/m <sup>2</sup> ] | MAPE [%] | Współczynnik korelacji [-] |
|-----|---------|---------|--------------------------|----------|----------------------------|
| 1.  | Lunda   | 19,97   | 38,27                    | 3,10     | 0,97                       |
| 2.  | Muneera | 34,46   | 47,35                    | 10,54    | 0,94                       |
| 3.  | Pereza  | 37,26   | 47,73                    | 9,54     | 0,94                       |

Analiza statystyczna wskazuje na model Lunda jako najbardziej zbliżony do danych prezentowanych w normie. Świadczą o tym najmniejsze wartości błędów oraz największy współczynnik korelacji. Nie oznacza to, że model Lunda najlepiej odwzorowuje natężenie promieniowania docierającego do płaszczyzny pionowej, a jedynie że jest on najbliższy danym zamieszczonym w normie, ponieważ, jak już wspomniano wcześniej, norma [238] nie precyzuje, czy dane te pochodzą z pomiarów, czy są wyznaczone analitycznie. We właściwej walidacji korzystano więc z modelu Lunda oceniając zapotrzebowanie na ciepło i chłód w pomieszczeniu testowym. Zestawienie zapotrzebowania na energię dla poszczególnych testów walidacyjnych przedstawiono w tabeli 4.12.

**Tabela 4.12.** Referencyjne zapotrzebowanie na ciepło ( $Q_{H,ref}$ ), chłód ( $Q_{C,ref}$ ) i całkowite ( $Q_{tot,ref}$ ) wg [238], oraz wyniki uzyskane w programie BSim (odpowiednio  $Q_H$  i  $Q_C$ ).

| Lp. | $Q_{H,ref}$<br>[kWh] | $Q_{C,ref}$<br>[kWh] | $Q_{tot,ref}$<br>[kWh] | $Q_H$<br>[kWh] | $Q_C$<br>[kWh] | $r_{QH}$<br>[-] | $r_{QC}$<br>[-] | Poziom dokładności |
|-----|----------------------|----------------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| 1.  | 748,0                | 233,8                | 981,8                  | 902,3          | 255,1          | 0,16            | 0,02            | - / A              |
| 2.  | 722,7                | 200,5                | 923,2                  | 865,3          | 204,4          | 0,15            | 0,00            | C / A              |
| 3.  | 1368,5               | 43,0                 | 1411,6                 | 1513,8         | 45,8           | 0,10            | 0,00            | B / A              |
| 4.  | 567,4                | 1530,9               | 2098,3                 | 858,2          | 1434           | 0,14            | 0,05            | C / A              |
| 5.  | 461,3                | 201,7                | 664,8                  | 487,1          | 219,5          | 0,04            | 0,03            | A / A              |
| 6.  | 509,8                | 185,1                | 694,9                  | 600,1          | 188,6          | 0,13            | 0,01            | C / A              |
| 7.  | 1067,4               | 19,5                 | 1086,9                 | 1078,4         | 17,2           | 0,01            | 0,00            | A / A              |
| 8.  | 313,2                | 1133,2               | 1446,4                 | 382,2          | 1111,8         | 0,05            | 0,01            | A / A              |
| 9.  | 747,1                | 158,3                | 905,4                  | 632,0          | 77,0           | 0,13            | 0,09            | C / B              |



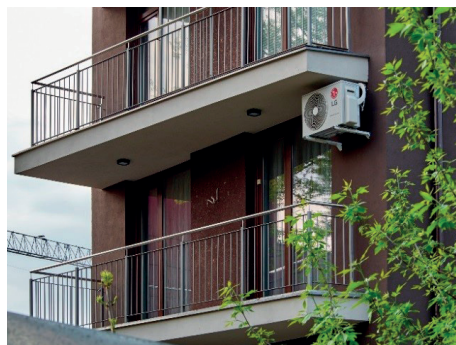
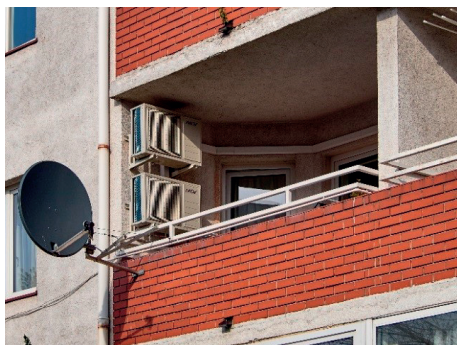
|     |        |       |        |        |       |      |      |       |
|-----|--------|-------|--------|--------|-------|------|------|-------|
| 10. | 574,2  | 192,4 | 766,6  | 508,9  | 133,2 | 0,09 | 0,08 | B / B |
| 11. | 1395,1 | 14,1  | 1409,3 | 1121,8 | 1,8   | 0,19 | 0,01 | - / A |
| 12. | 533,5  | 928,3 | 1461,8 | 554,4  | 754,4 | 0,01 | 0,12 | A / C |

Najlepszą zgodność wyników z danymi referencyjnymi uzyskano dla testów 5 – 8, w których modelowane jest pomieszczenie sąsiadujące z pomieszczeniami o podobnym charakterze (przegrody boczne i sufit są przegrodami adiabatycznymi, poza ścianą zewnętrzną skierowaną na zachód). Poza jednym przypadkiem, czyli zapotrzebowaniem na ciepło w pomieszczeniu o zmienionej pojemności cieplnej, wyniki spełniają wymagania poziomu dokładności A. Testy 9 – 12, w których przegroda ograniczająca pomieszczenie od góry styka się z powietrzem zewnętrznym, wypadły nieco gorzej. W tej grupie badań konieczne było dodatkowe uwzględnienie radiacyjnej wymiany ciepła w okresie letnim aby uzyskać dobrą zgodność zapotrzebowania na chłód z wynikami odniesienia. W testach początkowych 1 – 4 widać znacznie lepsze dopasowanie zapotrzebowania na chłód (poziom dokładności A we wszystkich zadaniach) niż na ciepło, gdzie w pierwszym zadaniu dopuszczalne odchyłki zostały nieznacznie przekroczone. Generalnie widać tendencję do lepszego odwzorowywania zapotrzebowania na energię w okresie letnim, ale i w okresie zimowym w połowie badań obowiązkowych uzyskano poziom A. Pewne problemy stwarzać może modelowanie pomieszczeń o dużych powierzchniach przegród oddających ciepło do nieboskłonu lub przegrodach słabiej izolowanych, ale dzięki świadomemu korzystaniu z programu i w takich sytuacjach można uzyskać wiarygodne wyniki.

## 5. Analiza symulacyjna zapotrzebowania na energię w przykładowych mieszkaniach z zabudowanym balkonem

Biorąc pod uwagę zapotrzebowanie na energię, wg [160] w ciągu roku można wyróżnić następujące charakterystyczne okresy:

- sezon grzewczy, kiedy pomieszczenia ogrzewane są na ogół w sposób ciągły, a największy wpływ na potrzeby grzewcze ma izolacyjność termiczna i szczelność przegród zewnętrznych;
- okresy przejściowe, poprzedzające i kończące sezon grzewczy, kiedy pomieszczenia ogrzewane są z przerwami w celu zachowania komfortu cieplnego i wykluczenia możliwości kondensacji wilgoci; w tym okresie, ze względu na niewielkie potrzeby grzewcze, szczególnie korzystne może być pasywne wykorzystanie energii słonecznej;
- okres ciepły, kiedy pomieszczeń nie ogrzewa się, a ze względu na warunki klimatyczne może okazać się konieczne chłodzenie lub intensywna wentylacja, usuwająca nadmiar ciepła.



Rys. 5.1. Mieszkania w budynkach wielorodzinnych wyposażone w klimatyzację (Lublin).

Zapewnienie komfortowych warunków w pomieszczeniach mieszkalnych w polskich warunkach klimatycznych wymaga ich ogrzewania przez co najmniej 6 miesięcy. W związku ze wzrostem temperatury zewnętrznej i falami upałów, niektórzy mieszkańcy decydują się również na okresowe chłodzenie pomieszczeń podczas lata (rys. 5.1). Wielkość zapotrzebowania na energię będzie od przede wszystkim od:

- środowiska zewnętrznego w jakim funkcjonuje budynek, czyli m. in. klimatu (a w szczególności temperatury powietrza i natężenia promieniowania słonecznego) i ukształtowania terenu oraz roślinności otaczającej obiekt (wpływającego na dostępność promieniowania słonecznego czy działanie wiatru),
- rozwiązań materiałowych części mieszkalnej budynku i przestrzeni słonecznej, decydujących o izolacyjności termicznej przegród pełnych i oszklonych, pojemności cieplnej i szczelności obudowy, przepuszczalności promieniowania słonecznego przez elementy przezroczyste,
- zachowania użytkowników, wynikającego z preferencji dotyczących temperatury wewnętrznej, wietrzenia pomieszczeń, użytkowania sprzętu gospodarstwa domowego.

Głównym celem symulacji będzie analiza skuteczności pozyskiwania energii słonecznej w przykładowych mieszkaniach z oszklonym balkonem w budynku wielorodzinnym. Jako miernik jakości funkcjonowania szklarniowego systemu pasywnego przyjęto zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniach w sezonie grzewczym i zapotrzebowanie na chłód w okresie letnim, w oczywisty sposób powiązane z ukształtowaniem przyległej przestrzeni słonecznej. Mimo że mieszkania w Polsce stosunkowo rzadko są mechanicznie chłodzone w lecie, taki sposób oceny jest stosowany w wielu pracach badawczych (choćby w [32, 60, 144, 232, 249, 282]), i pozwala na przejrzyste porównanie efektywności systemów pasywnych o różnych parametrach. Całoroczna analiza zapotrzebowania na energię jest uzasadniona faktem, że konsekwencją przystosowania budynków do pasywnego pozyskiwania energii słonecznej może być przegrzewanie pomieszczeń w lecie lub znaczne straty ciepła w okresach o mniejszym nasłonecznieniu, co podkreślają autorzy prac [1, 3, 6, 144, 148, 190, 191, 210]. Celem badań będzie poszukiwanie rozwiązań korzystnych z punktu widzenia oszczędności energii w sezonie grzewczym, ale także ograniczających potrzebę chłodzenia latem.

### 5.1. Dyskusja założeń przyjętych w modelu symulacyjnym

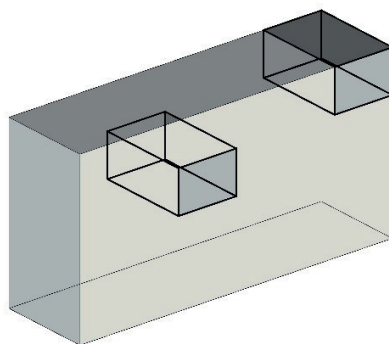
Analizowany układ to mieszkanie o powierzchni użytkowej netto 75 m<sup>2</sup>, z balkonem zewnętrznym o powierzchni ok. 5 m<sup>2</sup>. Pomieszczenia mieszkalne rozmieszczone są symetrycznie, a jeden z pokoi sąsiaduje z balkonem (rys. 5.2). W przeciwległych ścianach zewnętrznych są okna o jednakowej powierzchni 1,50 x 1,50 m, dobranej ze względu na zalecenia dotyczące zapewnienia naturalnego oświetlenia pomieszczeń zawarte w [211]. W ścianie pomiędzy balkonem a pomieszczeniem mieszkalnym znajduje się okno o wymiarach 1,20 x 1,50 m i drzwi balkonowe 0,90 x 2,35 m.



**Rys. 5.2.** Schemat mieszkania z wydzielonymi strefami termicznymi: strefa 1 – balkon, strefa 2 – pomieszczenie sąsiadujące z balkonem, strefa 3 – pozostała część mieszkania.

Powierzchnia otworów okiennych jest przyjęta jako stała. Autorzy pracy [141] analizowali wpływ powierzchni okien w ścianie pomiędzy szklarnią a pomieszczeniem mieszkalnym w budynku jednorodzinnym, wykazując, że zwiększenie powierzchni otworów skutkuje zwiększeniem zapotrzebowania na ciepło i chłód w pomieszczeniu, a rozwiązaniem najlepszym jest zastosowanie w tym miejscu przegrody pełnej. W budynkach wielorodzinnych zalecenie to jest w zasadzie niemożliwe do spełnienia, ze względu na mniejszą powierzchnię ścian zewnętrznych i układ funkcjonalny większości mieszkań, wymuszający doświetlenie pomieszczenia sąsiadującego z przestrzenią słoneczną właśnie przez okna lub drzwi wychodzące na balkon.

W wariancie pierwszym mieszkanie zlokalizowane jest w środkowej części kondygnacji powtarzalnej i ma dwie przeciwległe przegrody zewnętrzne, oraz dwie wewnętrzne oddzielające je od pomieszczeń o podobnej funkcji (rys. 5.3). Jest to układ dominujący w zabudowie wielorodzinnej, o najmniejszym zapotrzebowaniu na ciepło. Drugi wariant to mieszkanie w części narożnej kondygnacji najwyższej, o czterech przegrodach stykających się z powietrzem zewnętrznym (trzy ściany i dach). Jest to wersja dla której oczekiwać można większego oddawania ciepła ze względu na zwiększoną powierzchnię przegród zewnętrznych i największego zapotrzebowania na ciepło w danym budynku. Jednocześnie pozioma powierzchnia dachu powodować może zwiększoną absorpcję promieniowania słonecznego, wpływającą na komfort użytkowania pomieszczeń. Źródła literaturowe podają, że mieszkania zlokalizowane na ostatniej kondygnacji są najbardziej narażone na przegrzewanie, a temperatura wewnętrzna w okresie letnim może być tam najwyższa [15, 16, 115].



Rys. 5.3. Schemat lokalizacji mieszkań w budynku.

Izolacyjność termiczna przegród zewnętrznych mieszkania odpowiada wymaganiom obowiązującym w Polsce od 2014 roku (ściany zewnętrzne:  $U \leq 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , dachy:  $U \leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , okna:  $U \leq 1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ). Wartości dopuszczalne dotyczące tych przegród są jednocześnie zbliżone do wymagań ustalonych w [304], obowiązujących od 1999 roku podczas sporządzania audytów na potrzeby termomodernizacji budynków (ściany zewnętrzne:  $U \leq 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , dachy:  $U \leq 0,22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ).

W literaturze prezentowane są różne podejścia do modelowania mieszkań ze szklarniami. W badaniach prowadzonych przez Hilliaho [99, 100, 101] całe mieszkanie traktowane jest jako jedna strefa termiczna, do której powietrze wentylacyjne dostarczane jest spoza oszklonego balkonu. Modelowanie mieszkania lub budynku jednorodzinnego jako jednej strefy stosowane jest również w [3, 6, 9, 37, 190, 191, 210], z kolei publikacje [22, 214, 215] ograniczają się do układu złożonego z pojedynczego pomieszczenia przyległego do szklarni.

W niniejszej pracy w mieszkaniu wyróżniono trzy strefy termiczne – balkon, sąsiadujące z nim pomieszczenie i pozostałe pomieszczenia mieszkalne (rys. 5.2), dla których w różny sposób zdefiniowano warunki wewnętrzne oraz sposób wymiany powietrza z otoczeniem. Balkon jest strefą nieogrzewaną. Strefa mieszkalna jest klimatyzowana, a założone nastawy ogrzewania i chłodzenia to  $20^\circ\text{C}$  i  $26^\circ\text{C}$ . Wewnętrzne zyski bytowe w mieszkaniu przyjęto zgodnie z [267] na poziomie  $7,10 \text{ W}/\text{m}^2$ , przy czym nie różnicowano ich w zależności od rodzaju pomieszczenia, dni tygodnia czy pory dnia, co jest podejściem powszechnie stosowanym w pracach nie koncentrujących się na dokładnej ocenie komfortu w strefie mieszkalnej. Wyróżnienie dodatkowej strefy termicznej w pokoju przylegającym do balkonu daje możliwość bardziej zbliżonego do warunków naturalnych modelowania wymiany powietrza między obiema strefami – w symulacjach założono, że powietrze wentylacyjne w strefie 2 jest wstępnie ogrzane w obszarze balkonu, a w strefie 3 pochodzi bezpośrednio z zewnątrz. Taki podział pozwala także na bardziej dokładną analizę wpływu systemu szklarniowego na zapotrzebowanie na energię.

Większość autorów prac badawczych nie precyzuje, w jaki sposób uwzględniana jest wymiana powietrza między balkonem a strefą mieszkalną (poza artykułami [6, 210], gdzie założono możliwość naturalnej wentylacji dzięki otwieraniu okien między przestrzenią słoneczną a pokojami). Stosunkowo mało jest też dostępnych w literaturze danych na temat naturalnej wymiany powietrza między oszklonymi balkonami a środowiskiem zewnętrznym. W badaniach opisanych w [72] mierzono szczelność zabudowanych werand w budynkach mieszkalnych w Taberg, na południu Szwecji. Zabudowane były one przy użyciu aluminiowych profili komorowych z pojedynczym oszkleniem, a wymiana powietrza między werandą a otoczeniem zmierzona przy pomocy gazu znakującego („tracer gas”) wyniosła 3,0 1/h. Projekt LEARN (Low Energy Architecture Research Unit) prowadzony przez Wydział Architektury i Planowania Przestrzennego London Metropolitan University podaje wielkość 1 wymiany na godzinę zmierzoną dla oszklonego balkonu w budynku wielorodzinnym w Zaandam (Holandia) [212]. Przedstawione w [35] pomiary szczelności oszklonych atriów w budynkach użyteczności publicznej przy nadciśnieniu 50 Pa dały wyniki  $n_{50}$  w przedziale od 0,7 do 14,0 wymian na godzinę. W modelowaniu przestrzeni słonecznych (w lepiej udokumentowanych pracach badawczych) infiltracja powietrza przyjmowana jest na ogół w zakresie od 1,0 do 4,0 wymian na godzinę [17, 99, 101], w zależności od orientacyjnie klasyfikowanej szczelności obudowy balkonów. Z kolei w normie [240] zaleca się przyjmować następujące poziomy infiltracji powietrza pomiędzy nieogrzewaną przestrzenią a środowiskiem zewnętrznym:

- jeżeli wszystkie złącza między komponentami są dobrze uszczelnione i nie ma otworów wentylacyjnych w obudowie – 0,5 1/h,
- jeżeli wszystkie złącza między komponentami są dobrze uszczelnione, a w obudowie istnieją małe otwory wentylacyjne – 1,0 1/h,
- jeżeli obudowa jest nieszczelna z powodu nielicznych stałych nieszczelności lub stałych otworów wentylacyjnych o małej powierzchni – 3,0 1/h,
- jeżeli obudowa jest nieszczelna z powodu licznych nieszczelności lub stałych otworów wentylacyjnych o znacznej powierzchni – 10,0 1/h.

W programie BSim (jak i w większości programów symulacyjnych) są pewne ograniczenia związane z modelowaniem wymiany powietrza. Możliwe jest uwzględnienie naturalnego wietrzenia przez stałe otwory w przegrodach zewnętrznych lub otwierane elementy stolarki rozmieszczone w różny sposób w obudowie (wentylacja jednostronna, na przestrzał lub z otworami na różnych poziomach), natomiast nie jest możliwe zamodelowanie wentylacji grawitacyjnej wykorzystującej kanały wentylacyjne, typowej dla polskiego budownictwa mieszkalnego. Poza wietrzeniem, wymianę powietrza między pomieszczeniami a środowiskiem zewnętrznym można określić poprzez stały lub zmienny przepływ wentylacyjny o określonym strumieniu, traktowany jako rodzaj wentylacji mechanicznej. Według [301] możliwe są trzy strategie wentylacji mechanicznej budynku z przestrzenią słoneczną:

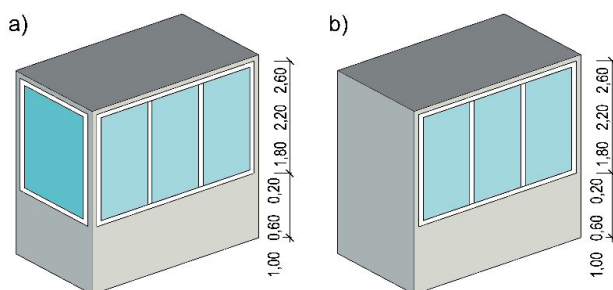


- niezależna wentylacja szklarni i budynku, wymagająca oddzielnego doprowadzenia powietrza do pomieszczeń,
- wykorzystanie szklarni do wstępnego ogrzania powietrza wentylacyjnego doprowadzanego do sąsiednich pomieszczeń mieszkalnych,
- dogrzewanie powietrza w szklarni poprzez wywiew powietrza z budynku.

W modelu wybrano strategię drugą (wg autorki najbardziej zbliżoną do rzeczywistego funkcjonowania oszklonego balkonu w budynku z wentylacją naturalną), przyjmując poziom wymiany powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych równy 0,5 1/h, co wg krajowych danych zawartych w [240] można uznać za typowe warunki w tradycyjnych wielorodzinnych budynkach mieszkalnych zlokalizowanych w miastach. W pokoju sąsiadującym z balkonem założono zmniejszenie wymiany do 0,3 1/h w sytuacji, gdy zastosowano obudowę balkonu o wyższej szczelności (obudowy oznaczone jako O 2.0 do O 2.5, tabele 5.3 i 5.4). Daje to wynikowe przepływy powietrza pomiędzy balkonem a środowiskiem zewnętrznym odpowiednio wynoszące około 1,4 1/h i 0,8 1/h.

Najwięcej uwagi w analizach poświęcono kształtowaniu balkonu jako kolektora promieniowania słonecznego. Sam kształt balkonu przyjęto jako stały – jest to prostokąt o proporcji boków 1:1,80, co jest powiązane z założonymi wymiarami mieszkania. Wstępne analizy przedstawione w cyklu artykułów [80, 81, 82, 83] wykazały, że mimo znacznego zróżnicowania rzutów obudowanego balkonu (które w pracy [80] zaplanowano na bazie figur takich jak prostokąt, czworobok czy trapezy o różnych proporcjach boków), całkowite potrzeby energetyczne w pomieszczeniu mieszkalnym nie zmieniały się znacząco. Jako korzystny wariant oceniono balkon prostokątny, dla którego uzyskano najmniejsze zapotrzebowanie na ciepło w sezonie grzewczym. Za takim rozwiązaniem przemawiają także względy praktyczne, czyli prostota wykonania samej płyty balkonowej oraz systemów oszklenia.

Obudowa balkonu jest oszklona na wszystkich ścianach zewnętrznych lub jedynie na ścianie frontowej, z pełną zabudową ścian bocznych. Wysokości oszklenia przyjęto równe 1,80 m, 2,20 m lub 2,60 m, w połączeniu ze ścianą podokienną o wysokości odpowiednio 1,00, 0,60 lub 0,20 m (rys. 5.4). Zdolność pochłaniania promieniowania przez powierzchnie wewnętrzne obudowy założono na poziomie 0,50.



**Rys. 5.4.** Wysokości oszklenia przyjęte w analizach: a) oszklenie na trzech ścianach obudowy, b) oszklenie na ścianie frontowej.



Rodzaje oszklenia wykorzystane w symulacjach zestawiono w tabeli 5.1. Zestawy oznaczone od O 1.0 do O 1.3 to zestawy jednoszybowe, ze szkła hartowanego o grubości 8 mm. Oszklenie podstawowe to O 1.0, ze szkła zwykłego bez powłok spektralnie selektywnych, charakteryzujące się największą przepuszczalnością promieniowania ale i najmniejszą izolacyjnością termiczną. Pozostałe oszklenia jednoszybowe mają powłokę od strony wewnętrznej, zmniejszającą przepuszczalność energii słonecznej i promieniowania widzialnego. Ze względu na większą zdolność odbicia promieniowania podczerwonego, zestawy O 1.2 i O 1.3 mają nieco lepszą izolacyjność termiczną. Zestawy oznaczone od O 2.0 do O 2.5 to zestawy dwuszybowe 4/12/4, z przestrzenią międzyszybową wypełnioną argonem lub kryptonem. Zestaw O 2.0 jest wykonany ze szkła zwykłego, pozostałe mają naniesione powłoki spektralnie selektywne na jednej lub dwu szybach (O 2.4 i O 2.5). Zwiększenie zdolności odbicia promieniowania podczerwonego zwiększa ich izolacyjność termiczną, ale odbywa się to kosztem zmniejszenia przepuszczalności energii słonecznej (rys. 5.5).

**Tabela 5.1.** Właściwości termiczne i optyczne zestawów szyb. Opracowano na podstawie bazy danych [33].

| Lp. | Oznaczenie | Liczba szyb | Powłoka spektralnie selektywna | $U_g$<br>[W/(m <sup>2</sup> ·K)] | $g$<br>[-] | $\tau_{vis}$<br>[-] | $\tau_s$<br>[-] | $\rho_s$<br>[-] | $g/U_g$<br>[(m <sup>2</sup> ·K)/W] |
|-----|------------|-------------|--------------------------------|----------------------------------|------------|---------------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|
| 1.  | O 1.0      | 1           | -                              | 5,6                              | 0,85       | 0,89                | 0,83            | 0,08            | 0,15                               |
| 2.  | O 1.1      | 1           | +                              | 5,6                              | 0,68       | 0,67                | 0,63            | 0,16            | 0,12                               |
| 3.  | O 1.2      | 1           | +                              | 5,3                              | 0,44       | 0,36                | 0,32            | 0,21            | 0,08                               |
| 4.  | O 1.3      | 1           | +                              | 5,1                              | 0,30       | 0,21                | 0,18            | 0,29            | 0,06                               |
| 5.  | O 2.0      | 2           | -                              | 2,7                              | 0,80       | 0,83                | 0,77            | 0,14            | 0,30                               |
| 6.  | O 2.1      | 2           | +                              | 1,4                              | 0,74       | 0,81                | 0,66            | 0,19            | 0,53                               |
| 7.  | O 2.2      | 2           | +                              | 1,3                              | 0,63       | 0,80                | 0,56            | 0,29            | 0,48                               |
| 8.  | O 2.3      | 2           | +                              | 1,2                              | 0,53       | 0,72                | 0,48            | 0,40            | 0,44                               |
| 9.  | O 2.4      | 2           | +                              | 1,1                              | 0,42       | 0,63                | 0,38            | 0,48            | 0,38                               |
| 10. | O 2.5      | 2           | +                              | 1,0                              | 0,36       | 0,54                | 0,31            | 0,49            | 0,36                               |

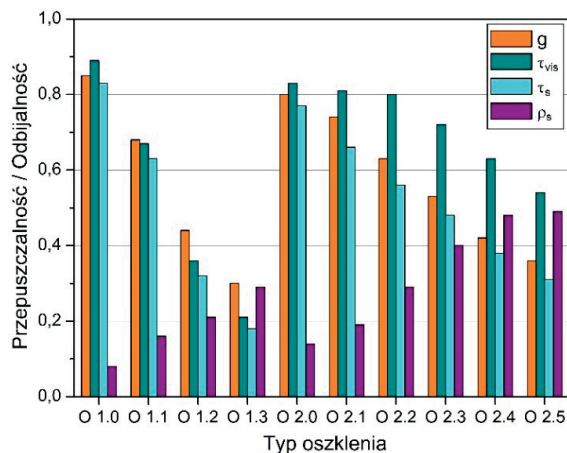
$U_g$  – współczynnik przenikania ciepła oszklenia

$g$  – współczynnik całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego

$\tau_{vis}$  – współczynnik przepuszczalności promieniowania widzialnego (380 nm – 780 nm)

$\tau_s$  – współczynnik przepuszczalności kierunkowego promieniowania słonecznego (300 nm – 2500 nm)

$\rho_s$  – współczynnik odbicia kierunkowego promieniowania słonecznego (300 nm – 2500 nm).



Rys. 5.5. Podstawowe cechy optyczne oszkleń. Opracowano na podstawie bazy danych [305].

Sama obudowa może charakteryzować się niską lub wysoką izolacyjnością termiczną (tabela 5.2). Odpowiada to rozwiązaniom najczęściej stosowanym w budynkach wielorodzinnych (opisanym w rozdziale 2), które reprezentują dwa typy funkcjonowania systemów pasywnych:

- zorientowanych na maksymalizację zysków słonecznych dzięki oszkleńciu o małej izolacyjności cieplnej i dużej przepuszczalności promieniowania słonecznego,
- zorientowanych na minimalizację strat ciepła poprzez zwiększenie izolacyjności cieplnej, powiązane na ogół ze zmniejszeniem zysków solarnych.

W obudowie o niskiej izolacyjności założono oszkleń z pojedynczych szyb, montowanych w systemie bezramowym (wersje od O 1.0 do O 1.3). W zależności od zastosowanych rozwiązań technicznych, szyby mogą być łączone w sposób szczelny lub z pozostawieniem kilku- lub nawet kilkunastomilimetrowych szczelin, stąd te warianty połączono z większą wymianą powietrza z otoczeniem zewnętrznym (1,4 l/h). W obudowie o pośredniej i wysokiej izolacyjności założono oszkleńia dwuszybowe. Te rodzaje obudowy połączono z wyższą szczelnością (wymiana z otoczeniem zewnętrznym 0,8 l/h).

Tabela 5.2. Konfiguracje zestawów oszkleń i typów obudowy balkonów.

| Lp. | Oznaczenie | Rama okienna | $U_f$<br>[W/(m <sup>2</sup> ·K)] | $U_{ok}$<br>[W/(m <sup>2</sup> ·K)] | Obudowa pełna | $U_{ob}$<br>[W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|-----|------------|--------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------|
| 1.  | O 1.0      | Aluminium    | 6,00                             | 5,7                                 | Nieizolowana  | 1,60                                |
| 2.  | O 1.1      | Aluminium    | 6,00                             | 5,7                                 | Nieizolowana  | 1,60                                |
| 3.  | O 1.2      | Aluminium    | 6,00                             | 5,4                                 | Nieizolowana  | 1,60                                |
| 4.  | O 1.3      | Aluminium    | 6,00                             | 5,3                                 | Nieizolowana  | 1,60                                |

| Lp. | Oznaczenie | Rama okienna | $U_f$<br>[W/(m <sup>2</sup> ·K)] | $U_{ok}$<br>[W/(m <sup>2</sup> ·K)] | Obudowa<br>pełna | $U_{ob}$<br>[W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|-----|------------|--------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| 5.  | O 2.0      | PCW          | 2,00                             | 2,6                                 | Pośrednia        | 0,65                                |
| 6.  | O 2.1      | PCW          | 1,20                             | 1,4                                 | Izolowana        | 0,30                                |
| 7.  | O 2.2      | PCW          | 1,20                             | 1,3                                 | Izolowana        | 0,30                                |
| 8.  | O 2.3      | PCW          | 1,20                             | 1,2                                 | Izolowana        | 0,30                                |
| 9.  | O 2.4      | PCW          | 1,20                             | 1,1                                 | Izolowana        | 0,30                                |
| 10. | O 2.5      | PCW          | 1,20                             | 1,0                                 | Izolowana        | 0,30                                |

$U_f$  – współczynnik przenikania ciepła ramy okiennej

$U_{ok}$  – współczynnik przenikania ciepła okna

$U_{ob}$  – współczynnik przenikania ciepła obudowy balkonu.

W okresie zimowym, aby zmaksymalizować zyski pasywne, oszklenie balkonu jest zamknięte i odsłonięte. W okresie letnim i przejściowym przewidziano możliwość wietrzenia balkonu poprzez otwarcie oszklenia, jeżeli temperatura powietrza wewnętrznego przekroczy 22°C. Założono również możliwość ograniczenia przegrzewania poprzez stosowanie zasłon o przepuszczalności promieniowania wynoszącej 50%, jeżeli temperatura wewnętrzna przekroczy 24°C lub natężenie promieniowania słonecznego transmitowanego przez oszklenie będzie większe niż 300 W/m<sup>2</sup>. W pomieszczeniach mieszkalnych progi wietrzenia i zaciemniania przyjęto na poziomie odpowiednio 24°C i 25°C. Jeżeli te sposoby usuwania nadmiaru ciepła nie przyniosą oczekiwanych rezultatów i temperatura wewnętrzna przekroczy 26°C, uruchamiane jest chłodzenie.

Uwzględniając zmiany poszczególnych parametrów, łącznie poddano analizie 600 przypadków obliczeniowych opisanych w tabeli 5.3. Wyniki symulacji porównano z wynikami uzyskanymi dla mieszkań z balkonami otwartymi.

**Tabela 5.3.** Podstawowe parametry przyjęte w badaniach symulacyjnych.

| Lp. | Parametr                                              | Liczba wariantów | Zakres zmienności                                                                                                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | Lokalizacja budynku                                   | 1                | III strefa klimatyczna – Warszawa                                                                                                                       |
| 2.  | Orientacja mieszkania (balkonu) względem stron świata | 5                | S, SE, E, SW, W<br>(co 45° względem stron świata)                                                                                                       |
| 3.  | Położenie mieszkania w budynku                        | 2                | lokalizacja środkowa i skrajna                                                                                                                          |
| 4.  | Izolacyjność przegród zewnętrznych mieszkania         | 1                | 0,25 W/(m <sup>2</sup> ·K) / 0,20 W/(m <sup>2</sup> ·K) / 1,30 W/(m <sup>2</sup> ·K) (ściany / dach / okna)                                             |
| 5.  | Wymiana powietrza                                     | 2                | 0,5 1/h / 0,5 1/h / 1,4 1/h (strefa 3 / 2 / 1, obudowa nieizolowana)<br>0,5 1/h / 0,3 1/h / 0,8 1/h (strefa 3 / 2 / 1, obudowa pośrednia lub izolowana) |

|     |                                                                                               |    |                                                                                        |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 6.  | Typ balkonu                                                                                   | 2  | balkon zewnętrzny w oszklony na 3 ścianach<br>balkon zewnętrzny z oszkleniem od frontu |
| 7.  | Rodzaj obudowy balkonu w powiązaniu ze szczelnością                                           | 3  | nieizolowana, pośrednia lub izolowana<br>dokładny opis – tabela 5.1 i 5.2              |
| 8.  | Rodzaj oszklenia balkonu (izolacyjność cieplna i przepuszczalność promieniowania słonecznego) | 10 | dokładny opis – tabela 5.1                                                             |
| 9.  | Wysokość oszklenia                                                                            | 3  | 1,80 m, 2,20 m, 2,60 m                                                                 |
| 10. | Absorpcyjność powierzchni wewnętrznych balkonu                                                | 1  | 0,5                                                                                    |

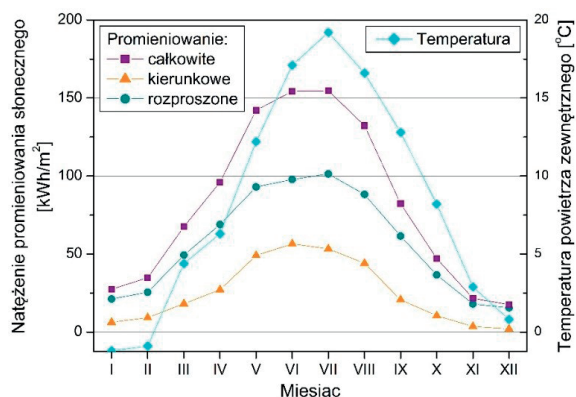
## 5.2. Dane klimatyczne wykorzystane w modelu symulacyjnym

Polska leży w strefie klimatu umiarkowanego, o charakterze przejściowym pomiędzy klimatem oceanicznym na zachodzie (Cfb) a klimatem kontynentalnym na wschodzie (Dfb – klimat kontynentalny z ciepłym latem) [151]. W okresie zimowym układ izoterm jest zbliżony do południkowego, a temperatura wzrasta w kierunku zachodnim. W okresie letnim układ izoterm jest zbliżony do równoleżnikowego, o najwyższych wartościach w środkowej części kraju. W latach 70. ubiegłego wieku wyodrębniono w Polsce pięć stref klimatycznych w okresie zimowym i dwie w letnim [234]. Charakteryzują się one zróżnicowaną temperaturą obliczeniową powietrza zewnętrznego, przyjmowaną na potrzeby doboru mocy instalacji grzewczych i chłodniczych [236]. Warszawa jest często przyjmowana jako reprezentatywna dla klimatu Polski, ponieważ tamtejsze warunki temperatury powietrza i nasłonecznienia odpowiadają średnim wielkościom z całego obszaru kraju [75].

W symulacjach wykorzystano dwa rodzaje danych klimatycznych. Pierwszy to Typowy Rok Meteorologiczny (TRM) dla stacji Warszawa Okęcie (szerokość geograficzna 52°10'E, długość geograficzna 20°58'N, wysokość posterunku 107 m n.p.m.), którym posłużono się w celu całorocznej oceny funkcjonowania mieszkania ze szklarnią. Drugi to rzeczywiste dane pomiarowe z okresu 2001 – 2015, pochodzące ze stacji meteorologicznych Warszawa Bielany (szerokość geograficzna 52°17'E, długość geograficzna 20°58'N, wysokość posterunku 98 m n.p.m., rodzaj danych – godzinne wartości natężenia promieniowania słonecznego całkowitego i rozproszonego) i Warszawa Okęcie (rodzaj danych – godzinne wartości temperatury powietrza, wilgotności względnej, kierunku i prędkości wiatru). Przy ich pomocy oceniono ryzyko przegrzewania pomieszczeń w okresie letnim.

### 5.2.1. Typowy Rok Meteorologiczny

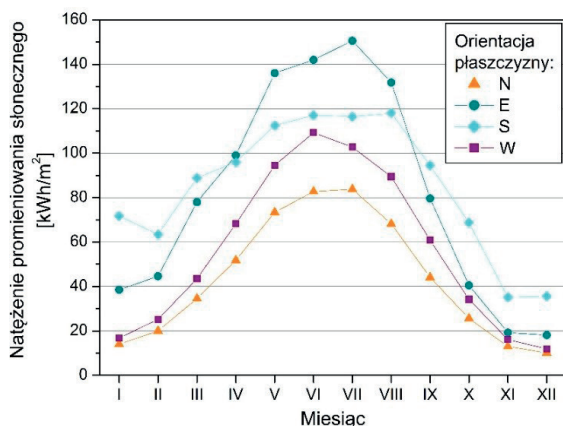
Typowe Lata Meteorologiczne opracowane zostały w 2004 roku na potrzeby certyfikacji energetycznej budynków [201, 202, 245]. Powstały one na podstawie danych źródłowych IMGW - PIB z okresu trzydziestu lat (od roku 1971 do roku 2000) dla 61 stacji meteorologicznych. Lata Typowe zawierają 8760 rekordów danych, obejmujących od kilku do kilkunastu godzinowych parametrów meteorologicznych pochodzących z obserwacji lub obliczonych na ich podstawie. Są to: numer godziny roku, miesiąc, dzień, godzina UTC, temperatura termometru suchego [°C], wilgotność względna [%], zawartość wilgoci [g/kg], prędkość wiatru [m/s], kierunek wiatru w 36 sektorach [wg klucza], całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą [ $\text{W/m}^2$ ], bezpośrednie i rozproszone natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą [ $\text{W/m}^2$ ], całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnie o orientacji N, NE, E, SE, S, SW, W, NW oraz pochyleniu do poziomu 30°, 45°, 60°, 90° [ $\text{W/m}^2$ ], temperatura promieniowania niebosłonu [°C] [107]. Dane niezbędne do przeprowadzenia symulacji obejmują godzinowe wartości temperatury powietrza, wilgotności względnej, kierunku i prędkości wiatru, a także natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyźnie poziomej w postaci kierunkowej i rozproszonej.



**Rys. 5.7.** Temperatura i natężenie promieniowania słonecznego na płaszczyźnie poziomej wg Typowego Roku Meteorologicznego, stacja Warszawa Okęcie.

Według Typowego Roku Meteorologicznego dla stacji Warszawa Okęcie najniższe średnie temperatury powietrza zewnętrznego występują w styczniu, lutym i grudniu (odpowiednio -1,2°C, -0,9°C i 0,8°C), a najwyższe w czerwcu, lipcu i sierpniu (17,1°C, 19,2°C, 16,6°C). Temperatury ekstremalne to -12,3°C (styczeń) i 33,2°C (sierpień). Najmniejsze nasłonecznienie przypada na grudzień, listopad i styczeń, największe – na lipiec, czerwiec i maj. Dominujący udział w promieniowaniu całkowitym ma składowa rozproszona, która stanowi średnio jego 76% w sezonie grzewczym (od września do maja) i 65% w pozostałych miesiącach (rys. 5.7).

Pozyskiwanie energii przez system szklarniowy uzależnione będzie w dużym stopniu od natężenia promieniowania docierającego do płaszczyzn pionowych o różnej orientacji względem stron świata (rys. 5.8). W symulacjach wielkości te zostały wyznaczone przy pomocy modelu Pereza (p. 4.3.3), który wykazał dobrą zgodność z wynikami pomiarów prowadzonych na terenie Polski [307]. W obliczeniach uwzględniono także promieniowanie odbite od powierzchni terenu.



**Rys. 5.8.** Natężenie promieniowania słonecznego padającego na płaszczyzny pionowe, obliczone wg modelu Pereza.

**Tabela 5.4.** Natężenie promieniowania słonecznego docierającego do płaszczyzn pionowych (kolorem niebieskim zaznaczono sumy najmniejsze, a żółtym – największe).

| Lp. | Okres     | Natężenie promieniowania słonecznego w zależności od orientacji płaszczyzny [kWh/m <sup>2</sup> ] |       |       |        |        |       |       |       |
|-----|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
|     |           | N                                                                                                 | NE    | E     | SE     | S      | SW    | W     | NW    |
| 1.  | I         | 14,0                                                                                              | 15,3  | 38,5  | 70,1   | 71,7   | 40,8  | 16,8  | 14,0  |
| 2.  | II        | 20,0                                                                                              | 24,9  | 44,6  | 64,5   | 63,4   | 41,9  | 25,2  | 20,0  |
| 3.  | III       | 34,6                                                                                              | 48,3  | 78,0  | 98,1   | 88,9   | 62,3  | 43,5  | 35,2  |
| 4.  | IV        | 51,8                                                                                              | 73,0  | 99,0  | 107,6  | 95,9   | 82,5  | 68,2  | 54,8  |
| 5.  | V         | 73,4                                                                                              | 107,3 | 136,0 | 134,0  | 112,4  | 105,6 | 94,5  | 77,1  |
| 6.  | VI        | 82,7                                                                                              | 116,2 | 142,0 | 136,5  | 117,0  | 117,2 | 109,2 | 89,0  |
| 7.  | VII       | 83,8                                                                                              | 123,2 | 150,6 | 141,6  | 116,5  | 112,4 | 102,7 | 84,5  |
| 8.  | VIII      | 68,2                                                                                              | 101,0 | 131,8 | 135,6  | 118,0  | 106,4 | 89,4  | 70,3  |
| 9.  | IX        | 44,1                                                                                              | 57,5  | 79,6  | 95,6   | 94,5   | 79,7  | 60,8  | 46,6  |
| 10. | X         | 25,6                                                                                              | 27,6  | 40,5  | 60,9   | 68,7   | 53,7  | 34,2  | 25,9  |
| 11. | XI        | 13,0                                                                                              | 13,3  | 19,2  | 30,8   | 35,2   | 26,7  | 16,1  | 13,0  |
| 12. | XII       | 10,1                                                                                              | 10,2  | 18,1  | 32,6   | 35,7   | 23,8  | 11,9  | 10,1  |
| 13. | IX - V    | 286,6                                                                                             | 377,4 | 553,5 | 694,2  | 666,4  | 517,0 | 371,2 | 296,7 |
| 14. | VI - VIII | 234,7                                                                                             | 340,4 | 424,4 | 413,7  | 351,5  | 336,0 | 301,3 | 243,8 |
| 15. | Cały rok  | 521,3                                                                                             | 717,8 | 977,9 | 1107,9 | 1017,9 | 853,0 | 672,5 | 540,5 |

Od września do maja (podczas sezonu grzewczego) oraz w ciągu całego roku największe ilości promieniowania słonecznego docierają do płaszczyzn pionowych skierowanych na południowy wschód i południe (tab. 5.4, rys. 5.8). Od czerwca do sierpnia najbardziej napromieniowane są płaszczyzny skierowane na wschód i południowy wschód. W całorocznym cyklu dość korzystny okazać się może kierunek południowy – w sezonie grzewczym natężenie promieniowania jest na drugim miejscu pod względem wysokości, a w okresie ciepłym jest mniejsze niż w przypadku orientacji wschodniej i południowo-wschodniej. Najmniej nasłonecznione w ciągu roku są płaszczyzny skierowane na północ i północny zachód.

### 5.2.2. Rzeczywiste dane klimatyczne

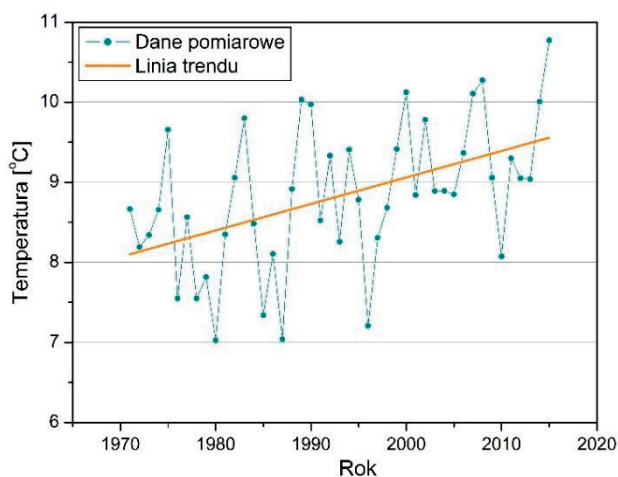
Sposób opracowania Lat Typowych uwzględnia fakt, że mają one służyć do wyznaczania charakterystyk nie odbiegających od wieloletnich średnich potrzeb energetycznych. Z tego względu przy wyborze danych preferowane były te miesiące, w których średnie wartości zmiennych, ich rozkład częstości i wzajemne korelacje były jak najbliższe średnim danym długookresowym. W wyniku otrzymano zestaw parametrów, który może nie obrazować w wiarygodny sposób ryzyka przegrzewania pomieszczeń, będącego zjawiskiem raczej krótkookresowym i związanym z ekstremalnymi wielkościami temperatury zewnętrznej.

Przewiduje się, że do końca XXI wieku postępujące zmiany klimatyczne mogą spowodować wzrost temperatury zewnętrznej (rys. 5.6), połączony z występowaniem łagodniejszych zim i cieplejszych okresów letnich [110, 277]. Może to przekładać się na zmiany w sposobie użytkowania i zużycie energii w budynkach [38, 47], czyli przede wszystkim zwiększenie udziału chłodzenia pomieszczeń w strukturze zapotrzebowania na energię. Aby ocenić ryzyko przegrzewania pomieszczeń funkcjonujących bez mechanicznego chłodzenia, w symulacjach posłużono się rzeczywistymi danymi klimatycznymi obejmującymi miesiące od czerwca do sierpnia z okresu 2001 – 2015, udostępnione przez IMGW – PIB na mocy ustawy o ponownym wykorzystaniu informacji sektora publicznego [293].

Wyboru roku, w którym ryzyko przegrzewania jest największe, dokonano na podstawie analizy następujących danych, zalecanych przez [92] i uzupełnionych przez autorkę:

- średniej temperatury,
- średniej temperatury podczas astronomicznego lata,
- maksymalnej temperatury,
- liczby godzin z temperaturą powyżej 26°C, 28°C i 30°C,
- występowania i długości fal upałów.





**Rys. 5.6.** Średnie roczne temperatury powietrza w okresie 1970 – 2015, stacja Warszawa Okęcie (na podstawie danych IMGW – PIB) i linia trendu wyznaczona metodą najmniejszych kwadratów.

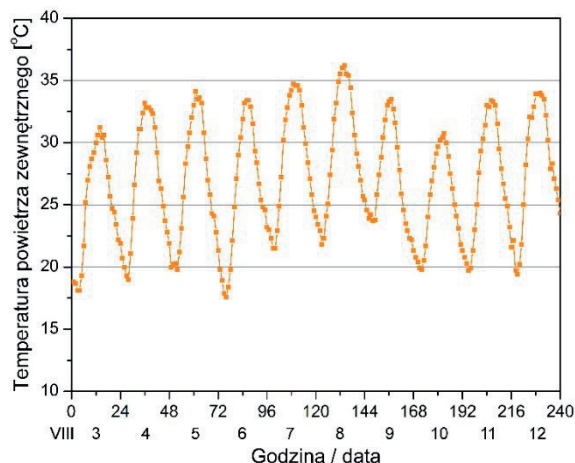
Falę upałów definiuje się najczęściej podając temperaturę graniczną i minimalny czas trwania [55, 276]. W niniejszej pracy jako falę upałów przyjęto ciąg co najmniej trzech kolejnych dni, w których temperatura maksymalna przekracza 30°C. Są to kryteria zaproponowane dla warunków klimatycznych Polski w publikacjach [155, 156].

**Tabela 5.5.** Charakterystyka lat 2001–2015 z uwagi na możliwość przegrzewania.

| Lp. | Rok  | Średnia temp. VI-VIII [°C] | Średnia temp. letnia [°C] | Maksymalna temp. [°C] | Liczba godzin z temp. powyżej: |      |      | Fale upałów [liczba dni] |
|-----|------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|------|------|--------------------------|
|     |      |                            |                           |                       | 26°C                           | 28°C | 30°C |                          |
| 1.  | 2001 | 18,4                       | 17,4                      | 33,9                  | 154                            | 72   | 19   | 3                        |
| 2.  | 2002 | 19,8                       | 18,6                      | 32,1                  | 236                            | 97   | 26   | 0                        |
| 3.  | 2003 | 19,0                       | 17,9                      | 31,3                  | 155                            | 59   | 13   | 0                        |
| 4.  | 2004 | 17,6                       | 17,4                      | 31,6                  | 79                             | 21   | 4    | 0                        |
| 5.  | 2005 | 18,1                       | 17,5                      | 32,1                  | 154                            | 43   | 13   | 3                        |
| 6.  | 2006 | 19,9                       | 18,4                      | 34,7                  | 317                            | 200  | 90   | 9                        |
| 7.  | 2007 | 18,9                       | 16,8                      | 35,0                  | 163                            | 72   | 31   | 3                        |
| 8.  | 2008 | 19,0                       | 17,1                      | 29,8                  | 154                            | 26   | 0    | 0                        |
| 9.  | 2009 | 18,2                       | 18,0                      | 30,4                  | 106                            | 39   | 5    | 0                        |
| 10. | 2010 | 19,8                       | 17,2                      | 34,1                  | 288                            | 157  | 71   | 4+3+3                    |
| 11. | 2011 | 18,6                       | 17,4                      | 31,0                  | 80                             | 36   | 5    | 0                        |

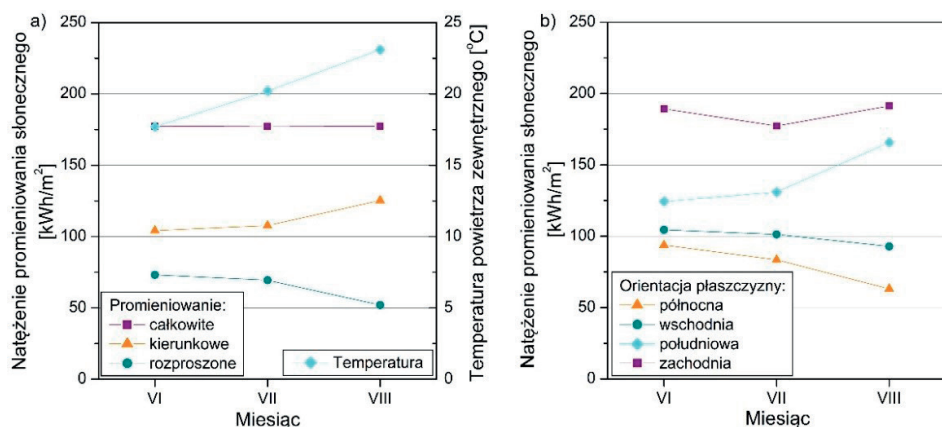
| Lp. | Rok  | Średnia temp.<br>VI-VIII<br>[°C] | Średnia<br>temp. letnia<br>[°C] | Maksy-<br>malna temp.<br>[°C] | Liczba godzin z temp.<br>powyżej: |      |      | Fale<br>upałów<br>[liczba dni] |
|-----|------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------|------|--------------------------------|
|     |      |                                  |                                 |                               | 26°C                              | 28°C | 30°C |                                |
| 12. | 2012 | 19,2                             | 18,0                            | 34,1                          | 228                               | 123  | 53   | 3                              |
| 13. | 2013 | 19,5                             | 17,8                            | 36,7                          | 199                               | 98   | 45   | 3                              |
| 14. | 2014 | 18,7                             | 18,2                            | 32,7                          | 224                               | 90   | 17   | 3                              |
| 15. | 2015 | 20,3                             | 20,0                            | 36,2                          | 395                               | 249  | 132  | 4+10+3                         |

Do sprawdzenia możliwości przegrzewania wybrano rok 2015. Był to rok z najwyższą średnią temperaturą od czerwca do sierpnia i najwyższą temperaturą podczas astronomicznego lata (21 VII – 23 IX). Odnotowano w nim także najdłuższe okresy podwyższonej temperatury i najdłuższe fale upałów, w tym maksymalną, 10. dniową, pomiędzy 3 a 12 VIII (rys. 5.9). Okres ten publikacje [155, 200] oceniają jako wyjątkowo uciążliwy w Polsce i Europie.



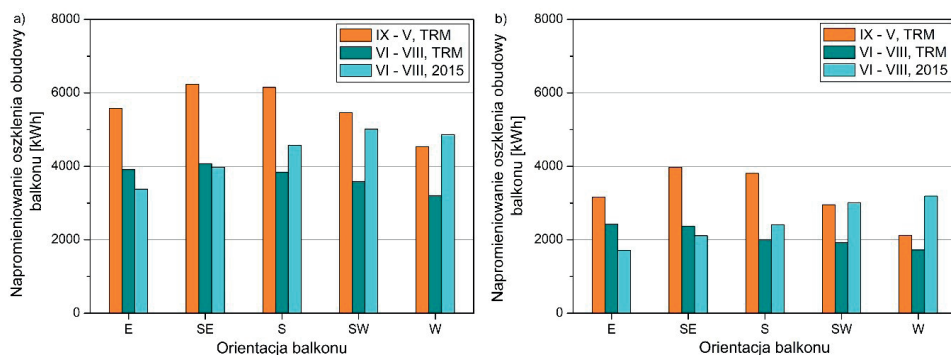
Rys. 5.9. Temperatura powietrza zewnętrznego od 3 do 12 VIII 2015, stacja Warszawa Okęcie.

W roku 2015 najwyższe temperatury występowały w czerwcu, lipcu i sierpniu (odpowiednio 17,7°C, 20,2°C, 23,1°C). Różnice natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyźnie poziomej były niewielkie, z tym że w sierpniu udział promieniowania kierunkowego wzrósł do 71%. Największe dawki promieniowania otrzymała płaszczyzna skierowana na zachód, drugie miejsce przypadło płaszczyźnie o orientacji południowej (rys 5.10).



Rys. 5.10. Podstawowe dane meteorologiczne od czerwca do sierpnia 2015 roku, stacja Warszawa Okęcie (temperatura) i Warszawa Bielany (promieniowanie): a) temperatura i natężenie promieniowania słonecznego na płaszczyźnie poziomej, b) natężenie promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę pionową.

Mimo, że natężenie promieniowania słonecznego docierającego do oszklenia obudowy będzie uzależnione od jego rozmieszczenia i wielkości, to decydujące znaczenie ma orientacja oszklenia frontowego, o największej powierzchni (rys. 5.11). W sezonie grzewczym najbardziej korzystne są kierunki południowo-wschodni i południowy, następnie wschodni i południowo-zachodni, a najmniej korzystnym jest zachód. Od czerwca do sierpnia wyniki różnią się w zależności od zestawu danych klimatycznych, z których korzystano. Według Typowego Roku Meteorologicznego, największe napromieniowanie wiąże się z orientacją wschodnią i południowo wschodnią, natomiast na podstawie danych z 2015 roku największe sumy promieniowania w ciągu lata otrzymano dla orientacji południowo-zachodniej i zachodniej.



Rys. 5.11. Napromieniowanie oszklenia obudowy balkonu w różnych okresach czasu na podstawie danych z TRM i 2015 roku: a) oszklenie na trzech ścianach obudowy, b) oszklenie na ścianie frontowej obudowy.

## 6. Wyniki symulacji

### 6.1. Sposób analizy danych

Jako podstawowe parametry pozwalające ocenić skuteczność pozyskiwania energii promieniowania słonecznego przyjęto zapotrzebowanie na ciepło i chłód w pomieszczeniu sąsiadującym z balkonem (strefa 2) i w całym mieszkaniu (strefa 2 i 3). Wielkości te zależne będą przede wszystkim od efektywnej powierzchni zbierającej oszklenia  $A_{sol}$  [m<sup>2</sup>], współczynnika strat ciepła przez przenikanie obudowy balkonu  $H_{tr}$  [W/K] i ich wzajemnej proporcji. Są one obliczane jako [241]:

$$A_{sol} = F_{sh,gl} \cdot g \cdot A_g, \quad (6.1)$$

gdzie:

$F_{sh,gl}$  – czynnik redukcyjny dla ruchomych urządzeń zacinających (żaluzje, zasłony) [-], przyjęto  $F_{sh,gl} = 1$ ,

$g$  – współczynnik przepuszczania energii słonecznej,  $g = 0,9 \cdot g_n$  [-],

$g_n$  – współczynnik przepuszczania energii słonecznej dla promieniowania prostopadłego do oszklenia [-],

$A_g$  – powierzchnia szyby [m<sup>2</sup>],

$$H_{tr} = \sum_i A_i \cdot U_i + \sum_j l_j \cdot \psi_j, \quad (6.2)$$

gdzie:

$A_i$  – pole powierzchni i-tej przegrody otaczającej przestrzeń ogrzewaną, obliczane wg wymiarów zewnętrznych przegrody [m<sup>2</sup>],

$U_i$  – całkowity współczynnik przenikania ciepła i-tej przegrody [W/(m<sup>2</sup>·K)],

$l_j$  – długość j-tego liniowego mostka cieplnego [m],

$\psi_j$  – liniowy współczynnik przenikania ciepła j-tego mostka cieplnego [W/(m·K)].

Ze względu na zmieniające się powierzchnie i właściwości elementów obudowy, współczynniki te są różne dla każdego z analizowanych wariantów (tabele 6.1 - 6.4).

**Tabela 6.1.** Parametry optyczne i termiczne obudowy balkonu, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy.

| Lp. | Typ oszklenia | $A_{sol}$ [m <sup>2</sup> ] |      |      | $H_{tr}$ [W/K]         |       |        | $A_{sol}/H_{tr}$ [(m <sup>2</sup> ·K)/W] |      |      |
|-----|---------------|-----------------------------|------|------|------------------------|-------|--------|------------------------------------------|------|------|
|     |               | Wysokość oszklenia [m]      |      |      | Wysokość oszklenia [m] |       |        | Wysokość oszklenia [m]                   |      |      |
|     |               | 1,80                        | 2,20 | 2,60 | 1,80                   | 2,20  | 2,60   | 1,80                                     | 2,20 | 2,60 |
| 1.  | O 1.0         | 6,60                        | 8,25 | 9,90 | 84,88                  | 94,94 | 105,00 | 0,08                                     | 0,09 | 0,09 |
| 2.  | O 1.1         | 5,28                        | 6,60 | 7,92 | 84,88                  | 94,94 | 105,00 | 0,06                                     | 0,07 | 0,08 |
| 3.  | O 1.2         | 3,42                        | 4,27 | 5,12 | 82,29                  | 91,71 | 101,12 | 0,04                                     | 0,05 | 0,05 |
| 4.  | O 1.3         | 2,33                        | 2,91 | 3,49 | 80,56                  | 89,55 | 98,54  | 0,03                                     | 0,03 | 0,04 |
| 5.  | O 2.0         | 6,21                        | 7,76 | 9,31 | 35,85                  | 40,69 | 45,53  | 0,17                                     | 0,19 | 0,20 |
| 6.  | O 2.1         | 5,74                        | 7,18 | 8,62 | 19,23                  | 21,96 | 24,69  | 0,30                                     | 0,33 | 0,35 |
| 7.  | O 2.2         | 4,89                        | 6,11 | 7,33 | 18,37                  | 20,89 | 23,40  | 0,27                                     | 0,29 | 0,31 |
| 8.  | O 2.3         | 4,11                        | 5,14 | 6,17 | 17,51                  | 19,81 | 22,11  | 0,23                                     | 0,26 | 0,28 |
| 9.  | O 2.4         | 3,26                        | 4,07 | 4,89 | 16,64                  | 18,73 | 20,81  | 0,20                                     | 0,22 | 0,23 |
| 10. | O 2.5         | 2,79                        | 3,49 | 4,19 | 15,78                  | 17,65 | 19,52  | 0,18                                     | 0,20 | 0,21 |

**Tabela 6.2.** Parametry optyczne i termiczne obudowy balkonu, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy.

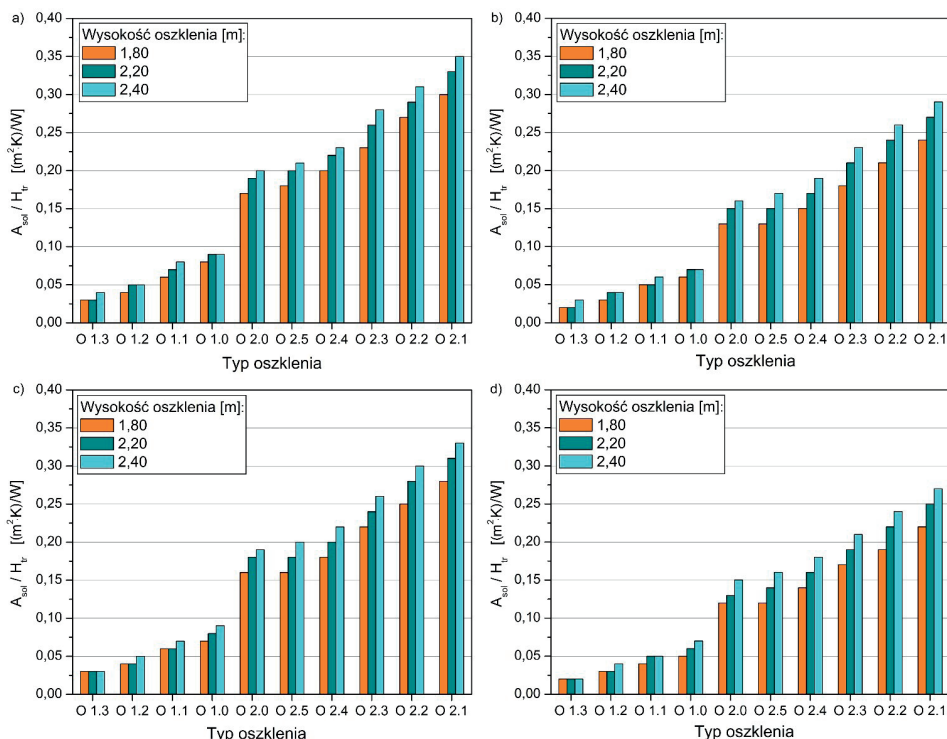
| Lp. | Typ oszklenia | $A_{sol}$ [m <sup>2</sup> ] |      |      | $H_{tr}$ [W/K]         |       |       | $A_{sol}/H_{tr}$ [(m <sup>2</sup> ·K)/W] |      |      |
|-----|---------------|-----------------------------|------|------|------------------------|-------|-------|------------------------------------------|------|------|
|     |               | Wysokość oszklenia [m]      |      |      | Wysokość oszklenia [m] |       |       | Wysokość oszklenia [m]                   |      |      |
|     |               | 1,80                        | 2,20 | 2,60 | 1,80                   | 2,20  | 2,60  | 1,80                                     | 2,20 | 2,60 |
| 1.  | O 1.0         | 3,50                        | 4,38 | 5,25 | 61,20                  | 66,26 | 71,31 | 0,06                                     | 0,07 | 0,07 |
| 2.  | O 1.1         | 2,80                        | 3,50 | 4,20 | 61,20                  | 66,26 | 71,31 | 0,05                                     | 0,05 | 0,06 |
| 3.  | O 1.2         | 1,81                        | 2,27 | 2,72 | 59,83                  | 64,54 | 69,25 | 0,03                                     | 0,04 | 0,04 |
| 4.  | O 1.3         | 1,24                        | 1,54 | 1,85 | 58,91                  | 63,40 | 67,88 | 0,02                                     | 0,02 | 0,03 |
| 5.  | O 2.0         | 3,29                        | 4,12 | 4,94 | 25,37                  | 27,86 | 30,34 | 0,13                                     | 0,15 | 0,16 |
| 6.  | O 2.1         | 3,05                        | 3,81 | 4,57 | 12,89                  | 14,27 | 15,65 | 0,24                                     | 0,27 | 0,29 |
| 7.  | O 2.2         | 2,59                        | 3,24 | 3,89 | 12,43                  | 13,70 | 14,96 | 0,21                                     | 0,24 | 0,26 |
| 8.  | O 2.3         | 2,18                        | 2,73 | 3,27 | 11,98                  | 13,13 | 14,28 | 0,18                                     | 0,21 | 0,23 |
| 9.  | O 2.4         | 1,73                        | 2,16 | 2,59 | 11,52                  | 12,55 | 13,59 | 0,15                                     | 0,17 | 0,19 |
| 10. | O 2.5         | 1,48                        | 1,85 | 2,22 | 11,06                  | 11,98 | 12,90 | 0,13                                     | 0,15 | 0,17 |

**Tabela 6.3.** Parametry optyczne i termiczne obudowy balkonu, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy.

| Lp. | Typ oszklenia | $A_{sol}$ [m <sup>2</sup> ] |      |      | $H_{tr}$ [W/K]         |        |        | $A_{sol}/H_{tr}$ [(m <sup>2</sup> ·K)/W] |      |      |
|-----|---------------|-----------------------------|------|------|------------------------|--------|--------|------------------------------------------|------|------|
|     |               | Wysokość oszklenia [m]      |      |      | Wysokość oszklenia [m] |        |        | Wysokość oszklenia [m]                   |      |      |
|     |               | 1,80                        | 2,20 | 2,60 | 1,80                   | 2,20   | 2,60   | 1,80                                     | 2,20 | 2,60 |
| 1.  | O 1.0         | 6,60                        | 8,25 | 9,90 | 92,04                  | 102,10 | 105,00 | 0,07                                     | 0,08 | 0,09 |
| 2.  | O 1.1         | 5,28                        | 6,60 | 7,92 | 92,04                  | 102,10 | 105,00 | 0,06                                     | 0,06 | 0,07 |
| 3.  | O 1.2         | 3,42                        | 4,27 | 5,12 | 89,45                  | 98,87  | 101,12 | 0,04                                     | 0,04 | 0,05 |
| 4.  | O 1.3         | 2,33                        | 2,91 | 3,49 | 87,73                  | 96,71  | 98,54  | 0,03                                     | 0,03 | 0,03 |
| 5.  | O 2.0         | 6,21                        | 7,76 | 9,31 | 38,54                  | 43,38  | 45,53  | 0,16                                     | 0,18 | 0,19 |
| 6.  | O 2.1         | 5,74                        | 7,18 | 8,62 | 20,47                  | 23,20  | 24,69  | 0,28                                     | 0,31 | 0,33 |
| 7.  | O 2.2         | 4,89                        | 6,11 | 7,33 | 19,60                  | 22,12  | 23,40  | 0,25                                     | 0,28 | 0,30 |
| 8.  | O 2.3         | 4,11                        | 5,14 | 6,17 | 18,74                  | 21,04  | 22,11  | 0,22                                     | 0,24 | 0,26 |
| 9.  | O 2.4         | 3,26                        | 4,07 | 4,89 | 17,88                  | 19,96  | 20,81  | 0,18                                     | 0,20 | 0,22 |
| 10. | O 2.5         | 2,79                        | 3,49 | 4,19 | 17,02                  | 18,89  | 19,52  | 0,16                                     | 0,18 | 0,20 |

**Tabela 6.4.** Parametry optyczne i termiczne obudowy balkonu, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy.

| Lp. | Typ oszklenia | $A_{sol}$ [m <sup>2</sup> ] |      |      | $H_{tr}$ [W/K]         |       |       | $A_{sol}/H_{tr}$ [(m <sup>2</sup> ·K)/W] |      |      |
|-----|---------------|-----------------------------|------|------|------------------------|-------|-------|------------------------------------------|------|------|
|     |               | Wysokość oszklenia [m]      |      |      | Wysokość oszklenia [m] |       |       | Wysokość oszklenia [m]                   |      |      |
|     |               | 1,80                        | 2,20 | 2,60 | 1,80                   | 2,20  | 2,60  | 1,80                                     | 2,20 | 2,60 |
| 1.  | O 1.0         | 3,50                        | 4,38 | 5,25 | 68,36                  | 73,42 | 78,48 | 0,05                                     | 0,06 | 0,07 |
| 2.  | O 1.1         | 2,80                        | 3,50 | 4,20 | 68,36                  | 73,42 | 78,48 | 0,04                                     | 0,05 | 0,05 |
| 3.  | O 1.2         | 1,81                        | 2,27 | 2,72 | 66,99                  | 71,70 | 76,42 | 0,03                                     | 0,03 | 0,04 |
| 4.  | O 1.3         | 1,24                        | 1,54 | 1,85 | 66,08                  | 70,56 | 75,04 | 0,02                                     | 0,02 | 0,02 |
| 5.  | O 2.0         | 3,29                        | 4,12 | 4,94 | 28,07                  | 30,55 | 33,04 | 0,12                                     | 0,13 | 0,15 |
| 6.  | O 2.1         | 3,05                        | 3,81 | 4,57 | 14,13                  | 15,50 | 16,88 | 0,22                                     | 0,25 | 0,27 |
| 7.  | O 2.2         | 2,59                        | 3,24 | 3,89 | 13,67                  | 14,93 | 16,20 | 0,19                                     | 0,22 | 0,24 |
| 8.  | O 2.3         | 2,18                        | 2,73 | 3,27 | 13,21                  | 14,36 | 15,51 | 0,17                                     | 0,19 | 0,21 |
| 9.  | O 2.4         | 1,73                        | 2,16 | 2,59 | 12,75                  | 13,79 | 14,82 | 0,14                                     | 0,16 | 0,18 |
| 10. | O 2.5         | 1,48                        | 1,85 | 2,22 | 12,30                  | 13,22 | 14,14 | 0,12                                     | 0,14 | 0,16 |



**Rys. 6.1.** Proporcje efektywnej powierzchni zbierającej oszklenia  $A_{sol}$  i współczynnika strat ciepła przez przenikanie obudowy balkonu  $H_{tr}$ . Mieszkanie w części środkowej budynku: a) oszklenie na 3 ścianach obudowy, b) oszklenie na 1 ścianie obudowy. Mieszkanie w części skrajnej budynku: c) oszklenie na 3 ścianach obudowy, d) oszklenie na 1 ścianie obudowy. Oszklenia uszeregowano zgodnie ze wzrostem proporcji  $A_{sol} / H_{tr}$ .

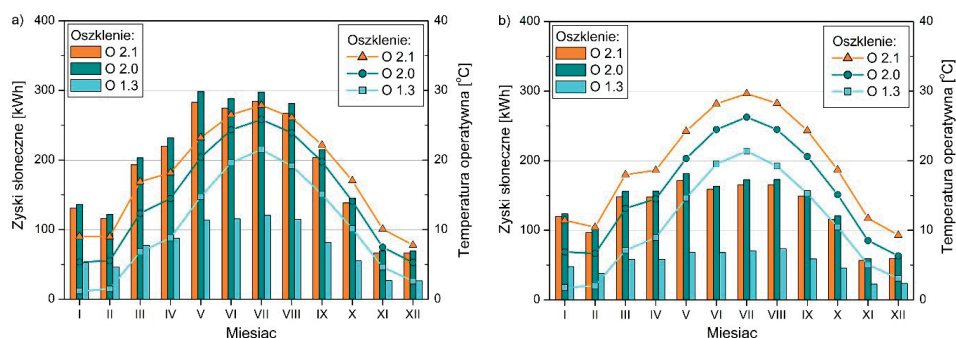
Wysoka izolacyjność cieplna oszkleń dwuszybowych z powłokami spektralnie selektywnymi pozwala uzyskać najwyższą proporcję  $A_{sol}$  i  $H_{tr}$  (rys. 6.1), a więc w tych wariantach można spodziewać się przewagi zysków słonecznych nad oddawaniem ciepła. Obudowy z oszkleniami jednoszybowymi, z powodu małej izolacyjności termicznej, mogą okazać się mniej skuteczne w konwersji promieniowania słonecznego.

Na rysunku 6.2 przedstawiono zyski słoneczne w przestrzeni balkonu dla wybranych oszkleń w porównaniu z temperaturą operatywną powietrza. Oszklenie O 2.0 daje największe zyski słoneczne, jednak wynikowa temperatura jest niższa niż np. przy zastosowaniu oszklenia typu O 2.1, o mniejszej przepuszczalności promieniowania słonecznego. Powodują to właśnie możliwości odprowadzenia ciepła na zewnątrz, większe dla obudowy o pośrednich właściwościach izolacyjnych z oszkleniem O 2.0 niż dla obudowy dobrze izolowanej z oszkleniem O 2.1. Najniższa temperatura operatywna jest wynikiem zastosowania oszklenia



o najmniejszej przepuszczalności promieniowania (O 1.3) w obudowie o małej izolacyjności termicznej. Prawidłowości te są zachowane w obu wersjach oszklenia obudowy, tzn. na trzech lub jednej ścianie.

Umieszczenie oszklenia jedynie na frontowej ścianie obudowy powoduje niewielki wzrost temperatury powietrza mimo znacznego spadku zysków słonecznych. Zastąpienie oszklenia na ścianach bocznych przegrodami pełnymi zmniejsza straty ciepła, dzięki czemu wynikowa temperatura w przestrzeni słonecznej rośnie.



**Rys. 6.2.** Zyski słoneczne i temperatura operatywna w szklarni. Mieszkanie w części środkowej budynku, wysokość oszklenia 2,20 m, balkon skierowany na południe: a) oszklenie na 3 ścianach obudowy, b) oszklenie na 1 ścianie obudowy.

Zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniach mieszkalnych jest w największym stopniu zależne od stosunku  $A_{sol}/H_{tr}$ , bez względu na lokalizację mieszkania i rodzaj obudowy balkonu (współczynniki korelacji od około -0,95 do około -0,97).

Powiązania między zapotrzebowaniem na chłód a cechami optycznymi i termicznymi obudowy przestrzeni słonecznej są nieco słabsze, ze względu na dodatkowe czynniki uwzględniane w symulacjach (takie jak wietrzenie i zasłanianie okien). Dla wariantów oszklonych na trzech ścianach najsilniejsze związki pojawiają się między zapotrzebowaniem na chłód a efektywną powierzchnią zbierającą oszklenia – współczynniki korelacji orientacyjnie wynoszą od -0,80 do -0,90. Zależność od proporcji  $A_{sol}/H_{tr}$  jest słabsza, co uwidacznia się w mniejszych współczynnikach korelacji (od -0,5 do -0,7). W sytuacji gdy oszklona jest tylko ściana frontowa obudowy, najwyższe współczynniki korelacji (również w przedziale od -0,80 do -0,90) występują pomiędzy zapotrzebowaniem na chłód a stosunkiem  $A_{sol}/H_{tr}$ .

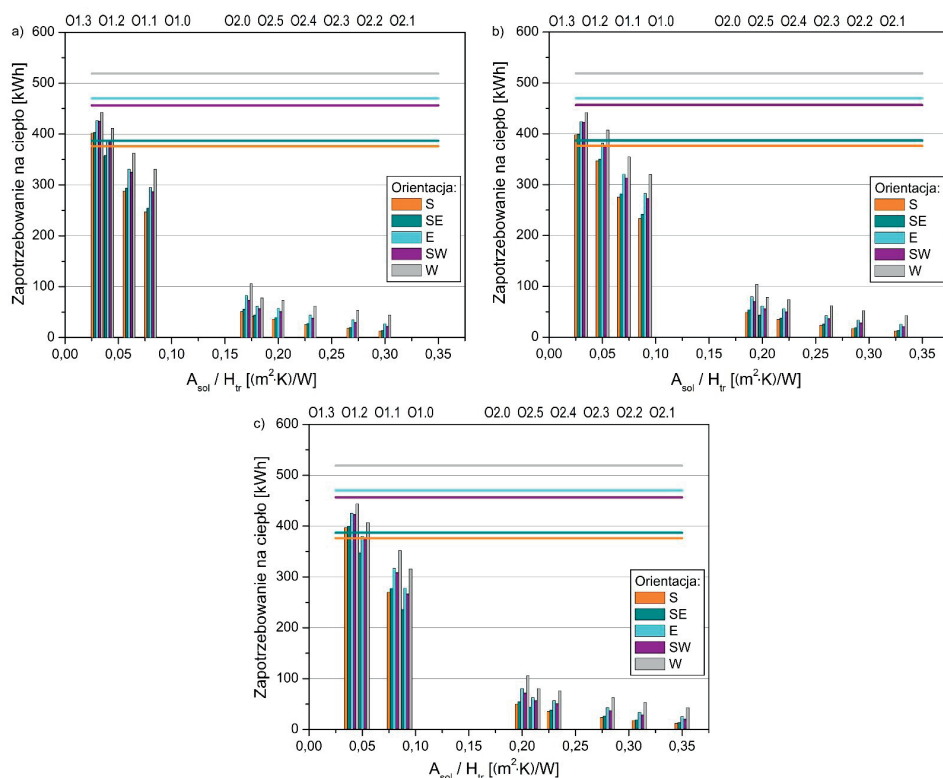
W dalszej części pracy wyniki zaprezentowano w zależności od wielkości  $A_{sol}/H_{tr}$ , ponieważ ma ona decydujące znaczenie w większości analizowanych przypadków. Jeżeli w okresie letnim pominięte zostanie wietrzenie poprzez otwieranie okien oraz ich zasłanianie, korelacje pomiędzy zapotrzebowaniem na chłód a proporcją  $A_{sol}/H_{tr}$  są największe (około -0,9).

## 6.2. Zapotrzebowanie na energię w pomieszczeniach jako wskaźnik skuteczności pozyskiwania energii słonecznej

### 6.2.1. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklelenie na trzech ścianach obudowy balkonu

#### Strefa 2

Niezależnie od wysokości oszklelenia, zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniu mieszkalnym przyległym do balkonu ma podobny charakter (rys. 6.3). Dla każdej orientacji szklarni, uszeregowanie wyników zgodnie z rosnącym stosunkiem  $A_{sol}/H_{tr}$  pokazuje spadek zapotrzebowania na energię (przy czym jest on bardziej łagodny w grupie oszkleń dwuszybowych).



**Rys. 6.3.** Zapotrzebowanie na ciepło w strefie 2 w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklelenie na 3 ścianach obudowy, wysokość oszklelenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

Skuteczność konwersji promieniowania słonecznego przez obudowy o niskiej izolacyjności termicznej z szybami pojedynczymi jest najmniejsza. Zastosowanie oszklenia typu O 1.3 (o najniższej przepuszczalności) wiąże się z największym zapotrzebowaniem na ciepło w pomieszczeniu mieszkalnym. Jeżeli balkon skierowany jest na południe lub południowy wschód, zapotrzebowanie na energię przekracza poziom w pomieszczeniu z balkonem otwartym, mimo korzystnych warunków helioenergetycznych. Małe zyski słoneczne, spowodowane niską przepuszczalnością promieniowania, nie zostały w tym przypadku skompensowane przez właściwości buforowe słabo izolowanej przestrzeni słonecznej. Lepszym rozwiązaniem okazało się pozostawienie balkonu otwartego i zapewnienie większych zysków bezpośrednich w pomieszczeniu mieszkalnym. Wzrost całkowitej przepuszczalności promieniowania słonecznego i stosunku  $A_{sol}/H_{tr}$  pozwolił ograniczyć zapotrzebowanie na ciepło średnio o 35% (oszklenie O 1.0) w stosunku do oszklenia O 1.3.

Obudowy izolowane termicznie z oszkleniami dwuszybowymi umożliwiają bardziej efektywne wykorzystanie energii słonecznej. W tej grupie wzrost stosunku  $A_{sol}/H_{tr}$  jest również czynnikiem korzystnym, a średnia różnica pomiędzy zapotrzebowaniem na energię dla oszklenia O 2.0 i O 2.1 wynosi 70%. Zapotrzebowanie na ciepło jest znacznie mniejsze niż w pomieszczeniu z balkonem otwartym bez względu na rodzaj obudowy, wysokość oszklenia i orientację przestrzeni słonecznej (rys. 6.3, tabela 6.5).

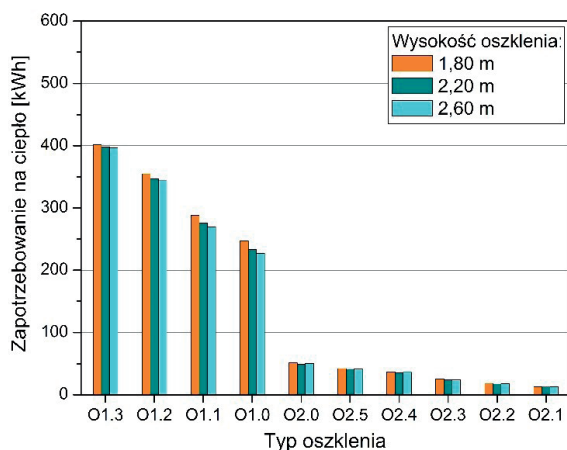
Najmniejsze zapotrzebowanie na energię uzyskano dla balkonu skierowanego na południe i południowy wschód. Te kierunki charakteryzuje największe napromieniowanie obudowy podczas sezonu grzewczego (rys. 5.11, tabela 5.4). Największe zapotrzebowanie na ciepło występuje z kolei dla orientacji zachodniej, o najmniejszym napromieniowaniu powierzchni oszklonych. Zmiany wynikające z modyfikacji położenia balkonu względem kierunku południowego wynoszą od około 10% do 40% (obudowy nieizolowane z oszkleniami jednoszybowymi), i od około 60% do prawie 250% (obudowy izolowane z oszkleniami dwuszybowymi).

**Tabela 6.5.** Zmiana zapotrzebowania na ciepło w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -34,4              | -38,0 | -39,7 | -34,2              | -37,5 | -39,0 | -37,2              | -39,9 | -40,9 | -37,2              | -40,3 | -41,6 | -36,2              | -38,3 | -39,1 |
| 2.  | O 1.1         | -23,4              | -26,8 | -28,3 | -24,0              | -27,1 | -28,5 | -29,6              | -31,8 | -32,6 | -28,8              | -31,3 | -32,4 | -30,1              | -31,7 | -32,2 |
| 3.  | O 1.2         | -5,6               | -7,8  | -8,6  | -7,5               | -9,5  | -10,2 | -17,5              | -18,8 | -19,1 | -15,6              | -17,1 | -17,6 | -20,7              | -21,5 | -21,6 |
| 4.  | O 1.3         | 6,8                | 5,7   | 5,5   | 4,2                | 3,2   | 3,2   | -9,3               | -9,8  | -9,6  | -6,7               | -7,4  | -7,3  | -14,7              | -14,8 | -14,5 |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5.  | O 2.0 | -86,4 | -87,1 | -86,6 | -85,5 | -86,2 | -85,9 | -82,5 | -83,1 | -82,9 | -83,8 | -84,5 | -84,2 | -79,6 | -80,0 | -79,7 |
| 6.  | O 2.1 | -96,5 | -96,7 | -96,7 | -96,3 | -96,5 | -96,5 | -94,2 | -94,6 | -94,6 | -95,1 | -95,4 | -95,4 | -91,4 | -91,8 | -91,7 |
| 7.  | O 2.2 | -95,2 | -95,4 | -95,3 | -94,8 | -95,2 | -95,1 | -92,5 | -92,9 | -92,8 | -93,4 | -93,8 | -93,8 | -89,7 | -89,9 | -89,8 |
| 8.  | O 2.3 | -93,3 | -93,6 | -93,6 | -92,9 | -93,3 | -93,2 | -90,7 | -91,0 | -90,9 | -91,6 | -91,9 | -91,9 | -88,0 | -88,1 | -87,9 |
| 9.  | O 2.4 | -90,3 | -90,6 | -90,4 | -89,9 | -90,2 | -90,0 | -87,9 | -88,1 | -87,9 | -88,8 | -89,0 | -88,9 | -85,8 | -85,7 | -85,3 |
| 10. | O 2.5 | -88,9 | -89,1 | -88,9 | -88,5 | -88,8 | -88,6 | -86,8 | -86,9 | -86,7 | -87,5 | -87,7 | -87,5 | -85,0 | -84,9 | -84,5 |

W większości przypadków zastosowanie oszkleń o większej wysokości jest lepszym rozwiązaniem (rys. 6.4). Efekty zwiększenia powierzchni przezroczystych nie są jednak duże (oszczędności wynoszą nie więcej niż 8%), szczególnie pośród obudów o wyższej izolacyjności termicznej z oszkleciami podwójnymi. Oznacza to, że zwiększone zyski słoneczne nie są w pełni wykorzystywane z powodu zwiększonych strat ciepła przez oszkleń.

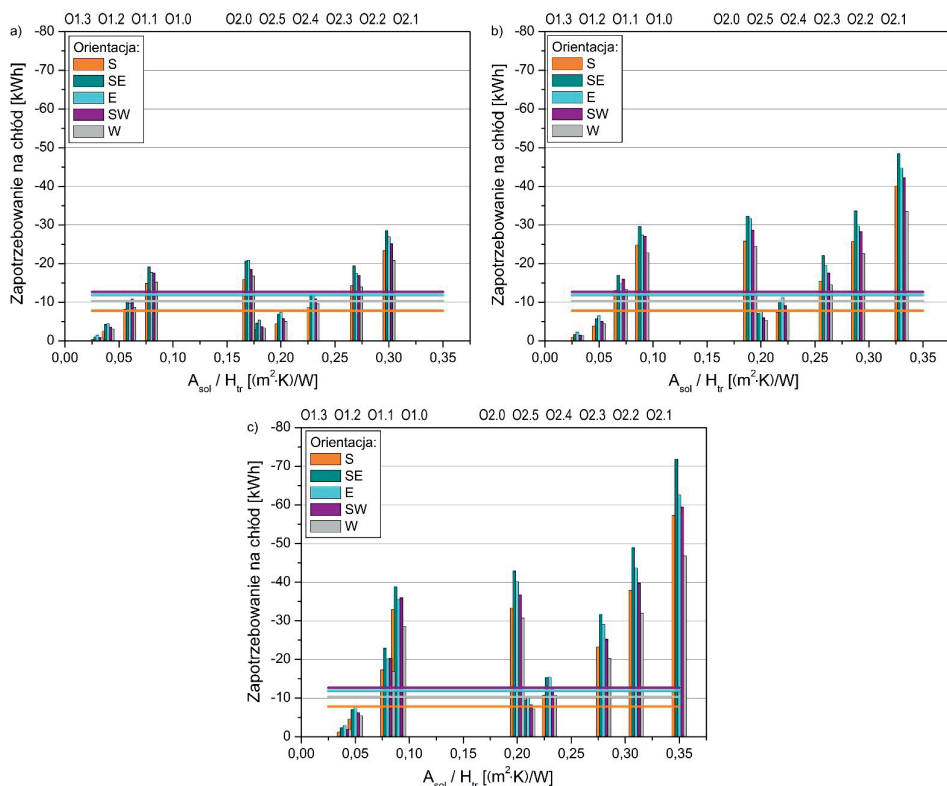


**Rys. 6.4.** Zapotrzebowanie na ciepło w strefie 2 w zależności od wysokości oszkleń. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszkleń na 3 ścianach obudowy, balkon skierowany na południe.

Wykresy zapotrzebowania na chłód mają podobny charakter niezależnie od wysokości oszkleń, jednak nie można tutaj ustalić jednoznacznego trendu w zależności od proporcji  $A_{sol}/H_{tr}$ , jak to ma miejsce dla zapotrzebowania na ciepło. Wzrost zapotrzebowania na chłód wraz ze wzrostem  $A_{sol}/H_{tr}$  występuje jedynie w obrębie danego typu oszkleń, tzn. dla oszkleń jednoszybowych lub dwuszybowych z powłokami spektralnie selektywnymi. Oszkleń dwuszybowe bez powłok spektralnie selektywnych (O 2.0) w obudowie o pośredniej izolacyjności termicznej odbiegają od pozostałych, powodując znacznie większe zapotrzebowanie na chłód niż oszkleń spektralnie selektywne typu O 2.5 w obudowie dobrze izolowanej o zbliżonej wielkości  $A_{sol}/H_{tr}$ . Podobne zależności pojawiają się, jeżeli w symulacjach pomimo pasywną regulację temperatury (dzięki wietrzeniu i zasłanianiu okien), czyli charakter wyników nie jest spowodowany założeniami

dotyczącymi użytkowania pomieszczeń. Oznacza to, że bardziej skutecznym działaniem zmniejszającym przegrzewanie jest ograniczenie zysków słonecznych (oszklenie O 2.5) niż umożliwienie bardziej intensywnego odprowadzania ciepła (oszklenie O 2.0).

Zapotrzebowanie na chłód jest najmniejsze jeżeli balkon skierowany jest na zachód, gdzie do obudowy docierają najmniejsze ilości promieniowania, lub na południe. Największe zapotrzebowanie występuje na ogół dla orientacji wschodniej lub południowo wschodniej, o największym napromieniowaniu obudowy (rys. 6.5, tabela 6.6). Skrajna zmiana położenia balkonu względem orientacji najbardziej korzystnej może zwiększyć zapotrzebowanie na chłód od około 25% do 182% wśród obudów nieizolowanych z oszklaceniami jednoszybowymi (z tym że największa wartość, czyli 182%, dotyczy bardzo niewielkich parametrów, tj. zmiany od 0,4 do 1,1 kWh). Wśród obudów izolowanych z oszklaceniami dwuszybowymi zmiany te wynoszą od około 30% do 59%.



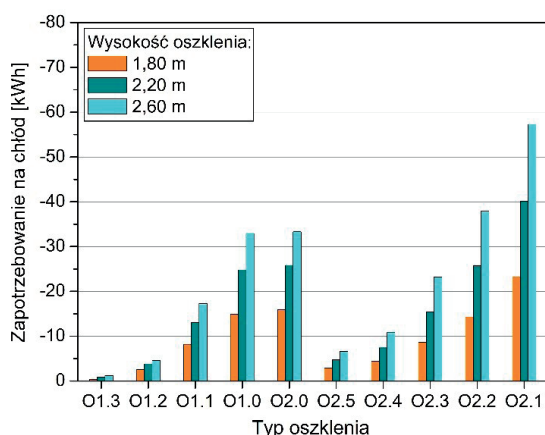
**Rys. 6.5.** Zapotrzebowanie na chłód w strefie 2 w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, wysokość oszklwienia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

Na ogół zabudowa balkonu zwiększa zapotrzebowanie na chłód w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym (do ponad 630% - oszklenie O 2.1, wysokość 2,60 m, orientacja południowa). Jedynie oszklenia o całkowitej przepuszczalności promieniowania poniżej 0,5 pozwalają zmniejszyć potrzeby chłodnicze (O 1.2, O 1.3, O 2.4, O 2.5, poza oszkleniem O 2.4 o wysokości 2,60 m).

**Tabela 6.6.** Zmiana zapotrzebowania na chłód w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

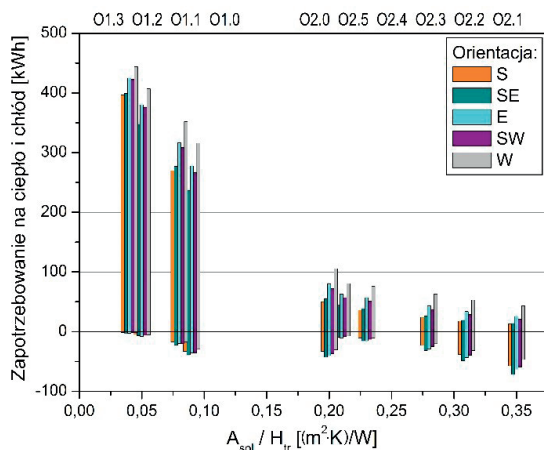
| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | 91,2               | 217,9 | 321,7 | 60,9               | 149,0 | 226,1 | 47,2               | 128,5 | 194,9 | 38,5               | 113,7 | 183,6 | 47,3               | 121,1 | 177,7 |
| 2.  | O 1.1         | 4,5                | 66,5  | 122,2 | -14,5              | 42,7  | 92,5  | -18,6              | 22,9  | 67,3  | -15,4              | 26,0  | 59,8  | -15,4              | 29,6  | 63,6  |
| 3.  | O 1.2         | -67,7              | -51,5 | -41,5 | -64,0              | -51,9 | -41,6 | -62,3              | -46,3 | -36,2 | -71,4              | -60,0 | -51,3 | -69,5              | -57,0 | -47,7 |
| 4.  | O 1.3         | -95,1              | -89,0 | -84,7 | -91,0              | -85,4 | -80,7 | -87,7              | -80,7 | -76,1 | -92,8              | -88,2 | -84,7 | -92,1              | -86,8 | -82,9 |
| 5.  | O 2.0         | 104,0              | 230,9 | 326,4 | 73,4               | 171,1 | 260,7 | 73,9               | 163,8 | 234,7 | 46,0               | 125,8 | 189,5 | 62,4               | 137,5 | 198,3 |
| 6.  | O 2.1         | 199,1              | 414,4 | 634,1 | 139,9              | 306,9 | 503,7 | 124,4              | 272,1 | 421,8 | 98,0               | 232,9 | 368,1 | 102,3              | 225,0 | 355,0 |
| 7.  | O 2.2         | 82,8               | 229,4 | 386,4 | 63,2               | 182,9 | 311,3 | 44,8               | 147,3 | 263,7 | 33,7               | 122,5 | 213,1 | 35,9               | 119,1 | 210,4 |
| 8.  | O 2.3         | 10,4               | 97,1  | 197,8 | 2,8                | 85,5  | 165,7 | -2,4               | 62,8  | 141,9 | -14,1              | 38,5  | 98,8  | -6,6               | 41,1  | 96,7  |
| 9.  | O 2.4         | -43,1              | -5,8  | 39,0  | -42,1              | -10,8 | 29,0  | -38,6              | -6,4  | 28,3  | -54,3              | -28,0 | 0,5   | -50,6              | -22,4 | 5,3   |
| 10. | O 2.5         | -62,8              | -39,4 | -15,1 | -61,3              | -40,3 | -19,8 | -55,2              | -34,1 | -14,3 | -70,7              | -52,9 | -35,0 | -68,1              | -48,9 | -29,6 |

Wysokość oszklenia odgrywa znacznie większą rolę w kształtowaniu zapotrzebowania na chłód niż zapotrzebowania na ciepło (rys. 6.6). Zwiększenie wysokości i powierzchni oszklenia spowodowało wzrost potrzeb energetycznych średnio o 60% i 120% (odpowiednio dla wysokości 2,20 i 2,60 m).



**Rys. 6.6.** Zapotrzebowanie na chłód w strefie 2 w zależności od wysokości oszklenia. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, balkon skierowany na południe.

Wśród obudów o małej izolacyjności termicznej, zapotrzebowanie na chłód stanowi niewielką część całkowitych potrzeb energetycznych, wynoszącą od 0,1% do 12%. Jeżeli bierzemy pod uwagę obudowy izolowane termicznie z oszkleniami podwójnymi powlekаныmi, wzrost proporcji  $A_{sol}/H_{tr}$  wiąże się ze znaczącym wzrostem udziału chłodzenia w bilansie energetycznym (rys. 6.7). W najgorszym przypadku (oszklenie O 2.1, wysokość 2,60 m, orientacja południowo-wschodnia) zapotrzebowanie na chłód stanowi ponad 80% całkowitego zapotrzebowania na energię i przekracza wielkość zapotrzebowania na ciepło blisko czterokrotnie.

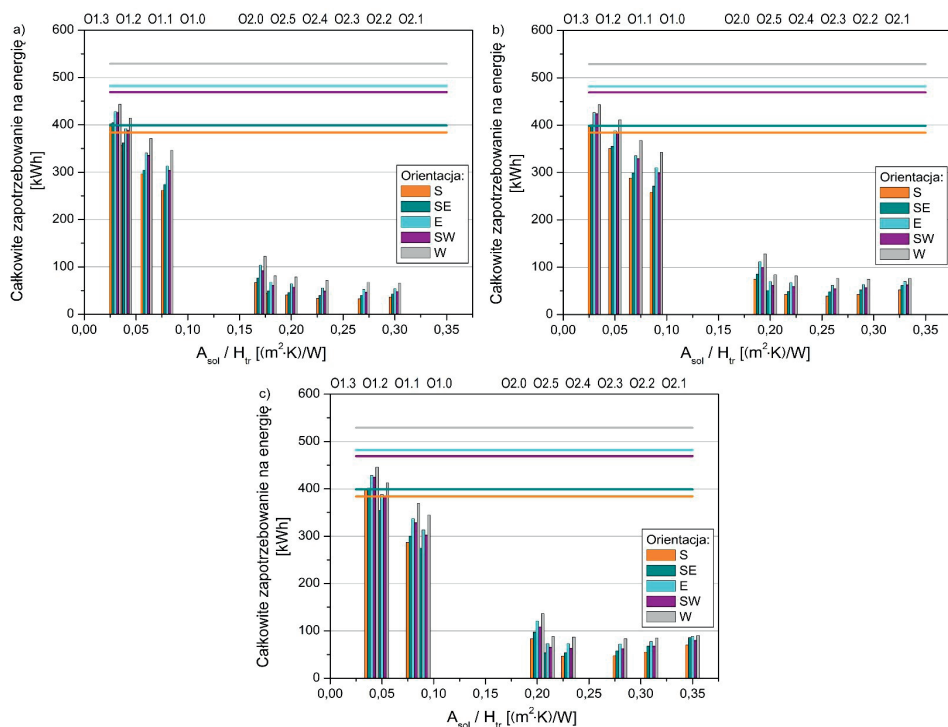


**Rys. 6.7.** Proporcje zapotrzebowania na ciepło i chłód w strefie 2. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, wysokość oszklenia 2,60 m.

Całkowite zapotrzebowanie na energię w strefie 2 osiąga maksimum dla oszkle-  
nia pojedynczego typu O 1.3, a dominujące znaczenie ma tutaj zapotrzebowanie  
na ciepło. Minimum uzyskano dla pośrednich wielkości  $A_{sol}/H_{tr}$  z grupy obudów  
dobrze izolowanych termicznie (rys. 6.8), przypadających w zakresie od 0,22 do  
0,30 ( $m^2 \cdot K)/W$  (przy czym większa wysokość oszklenia oraz większe nasłonecz-  
nienie elewacji powodują zmniejszenie najbardziej korzystnej proporcji  $A_{sol}/$   
 $H_{tr}$ ). Oszklenia redukujące zapotrzebowanie na energię w największym stopniu  
to przede wszystkim O 2.3 i O 2.2 (tabela 6.7). W grupie oszkleń podwójnych naj-  
większy wpływ na całkowite potrzeby energetyczne może mieć zapotrzebowanie  
na ciepło (oszklenia bez powłok lub o małej przepuszczalności promieniowania)  
albo zapotrzebowanie na chłód (oszklenia o większej przepuszczalności promie-  
niowania słonecznego).

Najbardziej korzystna jest orientacja balkonu południowa i południowo-  
wschodnia, najmniej – zachodnia, tak samo jak dla zapotrzebowania na ciepło.





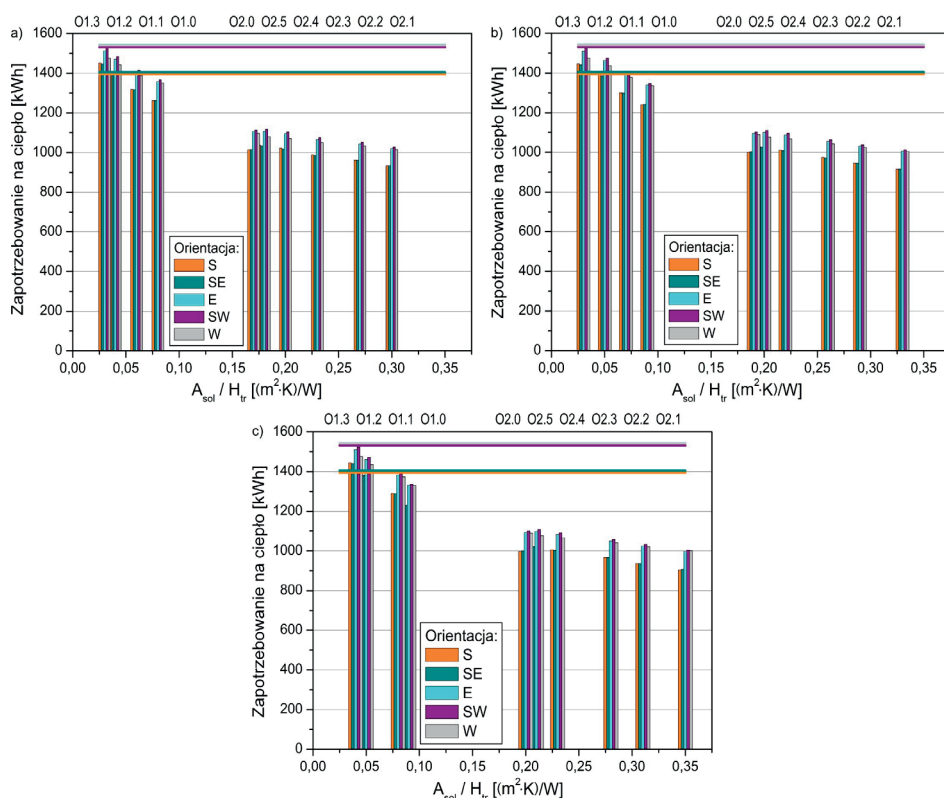
**Rys. 6.8.** Całkowite zapotrzebowanie na energię w strefie 2 w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklelenie na 3 ścianach obudowy, wysokość oszklelenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

**Tabela 6.7.** Zmiana całkowitego zapotrzebowania na energię w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklelenie na 3 ścianach balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklelenia | Orientacja balkonu   |       |       |                      |       |       |                      |       |       |                      |       |       |
|-----|-----------------|----------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
|     |                 | S                    |       |       | SE                   |       |       | E                    |       |       | SW                   |       |       |
|     |                 | Wys. oszklelenia [m] |       |       | Wys. oszklelenia [m] |       |       | Wys. oszklelenia [m] |       |       | Wys. oszklelenia [m] |       |       |
|     |                 | 1,80                 | 2,20  | 2,60  | 1,80                 | 2,20  | 2,60  | 1,80                 | 2,20  | 2,60  | 1,80                 | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0           | -31,8                | -32,8 | -32,3 | -31,3                | -32,0 | -31,1 | -35,1                | -35,7 | -35,1 | -35,2                | -36,1 | -35,5 |
| 2.  | O 1.1           | -22,8                | -24,9 | -25,3 | -23,7                | -25,0 | -24,8 | -29,4                | -30,4 | -30,1 | -28,5                | -29,8 | -29,9 |
| 3.  | O 1.2           | -6,9                 | -8,7  | -9,3  | -9,2                 | -10,8 | -11,1 | -18,6                | -19,5 | -19,5 | -17,2                | -18,3 | -18,5 |
| 4.  | O 1.3           | 4,7                  | 3,7   | 3,7   | 1,4                  | 0,6   | 0,7   | -11,2                | -11,5 | -11,2 | -9,1                 | -9,6  | -9,4  |
| 5.  | O 2.0           | -82,5                | -80,6 | -78,3 | -80,8                | -78,5 | -75,5 | -78,6                | -77,0 | -75,0 | -80,3                | -78,8 | -76,8 |
| 6.  | O 2.1           | -90,5                | -86,3 | -81,8 | -89,3                | -84,5 | -78,6 | -88,8                | -85,5 | -81,7 | -89,9                | -86,6 | -82,9 |
| 7.  | O 2.2           | -91,5                | -88,8 | -85,6 | -90,1                | -86,9 | -83,0 | -89,1                | -86,9 | -83,9 | -90,0                | -88,0 | -85,5 |
| 8.  | O 2.3           | -91,2                | -89,8 | -87,7 | -90,1                | -88,0 | -85,5 | -88,5                | -87,2 | -85,1 | -89,5                | -88,4 | -86,7 |
| 9.  | O 2.4           | -89,4                | -88,9 | -87,8 | -88,5                | -87,8 | -86,5 | -86,7                | -86,1 | -85,0 | -87,9                | -87,4 | -86,4 |
| 10. | O 2.5           | -88,3                | -88,1 | -87,4 | -87,7                | -87,3 | -86,5 | -86,0                | -85,6 | -84,9 | -87,0                | -86,8 | -86,1 |

### Strefa 2 i 3

Zapotrzebowanie na ciepło w całym mieszkaniu jest mniej zróżnicowane w zależności od rodzaju obudowy czy orientacji szklarni niż w strefie 2. Obudowy z oszkleniem typu O 1.3 i O 2.1 są odpowiednio najmniej i najbardziej skuteczne w konwersji promieniowania słonecznego. Zastosowanie oszklenia o niskiej przepuszczalności promieniowania (O 1.3) w obudowie o małej izolacyjności termicznej może spowodować wzrost zapotrzebowania na ciepło ponad poziom obliczony dla mieszkania z otwartym balkonem, co wynika przede wszystkim z ograniczenia zysków słonecznych w strefie 2. Oszczędności energetyczne wyznaczone w odniesieniu do całego mieszkania są znacznie mniejsze niż w pomieszczeniu sąsiadującym z balkonem, ale sięgają do około 35%, co jest na pewno wynikiem przekładającym się na realne korzyści podczas użytkowania obiektu.



**Rys. 6.9.** Zapotrzebowanie na ciepło w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

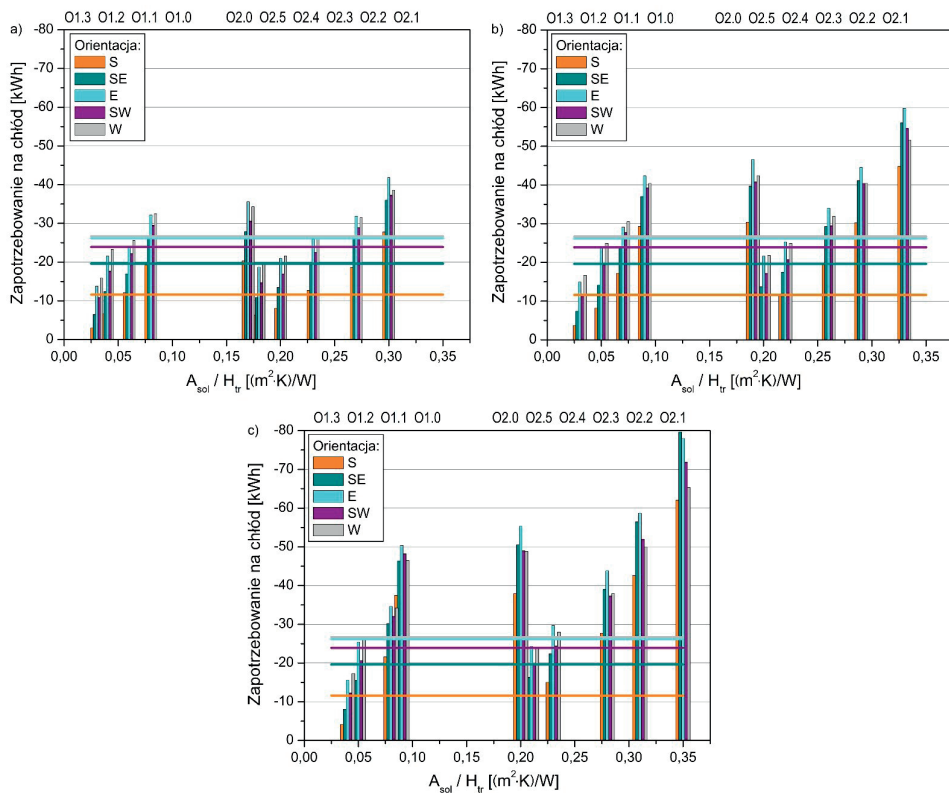
Zapotrzebowanie na ciepło dla całego mieszkania jest najmniejsze, jeżeli balkon skierowany jest na południe lub południowy wschód (rys. 6.9, tabela 6.8), tak jak i w strefie 2. Najgorszym położeniem balkonu jest południowy zachód, z tym że wyniki uzyskane dla orientacji wschodniej i zachodniej nie odbiegają znacznie od maksymalnego zapotrzebowania na energię. Zmiany wynikające z modyfikacji położenia balkonu względem kierunku najbardziej korzystnego wyniosły od około 5% do 9% (obudowy nieizolowane z oszkleniami jednoszybowymi), i od około 8% do 10% (obudowy izolowane z oszkleniami dwuszybowymi).

**Tabela 6.8.** Zmiana zapotrzebowania na ciepło w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2 i 3, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -9,4               | -11,1 | -11,9 | -10,1              | -11,6 | -12,4 | -12,0              | -13,2 | -13,8 | -10,8              | -12,1 | -12,7 | -12,4              | -13,3 | -13,8 |
| 2.  | O 1.1         | -5,5               | -6,8  | -7,5  | -6,3               | -7,6  | -8,2  | -9,1               | -10,0 | -10,4 | -7,6               | -8,6  | -9,1  | -10,0              | -10,7 | -11,0 |
| 3.  | O 1.2         | 0,4                | -0,4  | -0,7  | -0,7               | -1,4  | -1,8  | -4,8               | -5,3  | -5,4  | -3,1               | -3,7  | -3,9  | -6,5               | -6,8  | -6,9  |
| 4.  | O 1.3         | 4,1                | 3,7   | 3,6   | 2,9                | 2,6   | 2,5   | -2,0               | -2,2  | -2,2  | -0,2               | -0,5  | -0,5  | -4,3               | -4,4  | -4,3  |
| 5.  | O 2.0         | -27,3              | -28,2 | -28,4 | -27,8              | -28,7 | -28,8 | -28,4              | -29,1 | -29,2 | -27,3              | -28,0 | -28,2 | -28,9              | -29,4 | -29,4 |
| 6.  | O 2.1         | -33,1              | -34,3 | -35,1 | -33,6              | -34,8 | -35,4 | -34,0              | -34,9 | -35,3 | -32,9              | -33,9 | -34,5 | -34,3              | -34,8 | -35,1 |
| 7.  | O 2.2         | -31,1              | -32,2 | -32,8 | -31,7              | -32,7 | -33,3 | -32,4              | -33,2 | -33,7 | -31,3              | -32,2 | -32,6 | -33,1              | -33,6 | -33,8 |
| 8.  | O 2.3         | -29,1              | -30,1 | -30,6 | -29,8              | -30,7 | -31,2 | -31,0              | -31,6 | -32,0 | -29,8              | -30,5 | -30,9 | -31,9              | -32,3 | -32,5 |
| 9.  | O 2.4         | -26,7              | -27,5 | -27,9 | -27,5              | -28,2 | -28,6 | -29,1              | -29,6 | -29,8 | -27,9              | -28,4 | -28,7 | -30,5              | -30,8 | -30,9 |
| 10. | O 2.5         | -25,6              | -26,2 | -26,5 | -26,4              | -27,0 | -27,3 | -28,3              | -28,7 | -28,9 | -27,0              | -27,5 | -27,7 | -30,0              | -30,2 | -30,2 |

Biorąc pod uwagę zapotrzebowanie na chłód, oszklenia o całkowitej przepuszczalności promieniowania poniżej 0,5 pozwalają obniżyć zapotrzebowanie na energię poniżej poziomu charakteryzującego mieszkanie z balkonem otwartym (O 1.2, O 1.3, O 2.4, O 2.5, poza oszkleniem O 2.4 o wysokości 2,60 m). W pozostałych przypadkach zabudowa balkonu zwiększa zapotrzebowanie na chłód, dla oszkleń podwójnych o największej wysokości nawet ponad czterokrotnie. Wyjątkiem jest oszklenie O 1.1 o najmniejszej wysokości (poza orientacją południową).

Południowa orientacja balkonu jest najbardziej korzystna, co wiąże się z małymi zyskami słonecznymi w części mieszkania skierowanej na północ (rys. 6.10, tabela 6.9). Najgorsze wyniki otrzymano dla kierunku wschodniego i zachodniego, ewentualnie południowo-wschodniego lub południowo-zachodniego (w niektórych przypadkach oszkleń o wysokości 2,60 m). Na skutek zmiany położenia balkonu względem orientacji południowej zapotrzebowanie na chłód może wzrosnąć od około 35% do 430% (obudowy nieizolowane z oszkleniami jednoszybowymi), i od około 26% do 208% (obudowy izolowane z oszkleniami dwuszybowymi).



**Rys. 6.10.** Zapotrzebowanie na chłód w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

**Tabela 6.9.** Zmiana zapotrzebowania na chłód w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2 i 3, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | 65,9               | 153,1 | 223,8 | 34,4               | 88,7  | 136,2 | 22,8               | 61,3  | 92,3  | 23,4               | 64,1  | 101,8 | 21,7               | 51,3  | 73,8  |
| 2.  | O 1.1         | 4,8                | 48,3  | 86,8  | -13,3              | 22,6  | 53,7  | -9,3               | 11,0  | 32,1  | -6,8               | 16,0  | 34,6  | -4,3               | 14,2  | 27,9  |
| 3.  | O 1.2         | -41,8              | -29,1 | -21,3 | -36,7              | -28,1 | -20,9 | -17,7              | -8,7  | -3,2  | -25,8              | -19,1 | -13,8 | -12,8              | -6,8  | -2,5  |
| 4.  | O 1.3         | -74,2              | -68,2 | -64,5 | -66,7              | -62,3 | -58,9 | -47,5              | -43,3 | -40,6 | -54,2              | -50,8 | -48,4 | -40,4              | -37,5 | -35,5 |
| 5.  | O 2.0         | 75,5               | 162,4 | 227,5 | 42,4               | 102,5 | 157,5 | 35,8               | 77,9  | 110,8 | 28,0               | 71,1  | 105,3 | 28,5               | 58,4  | 82,5  |
| 6.  | O 2.1         | 140,6              | 287,3 | 436,5 | 83,4               | 185,7 | 305,9 | 59,3               | 128,0 | 197,5 | 56,1               | 128,8 | 201,3 | 44,4               | 93,0  | 144,2 |

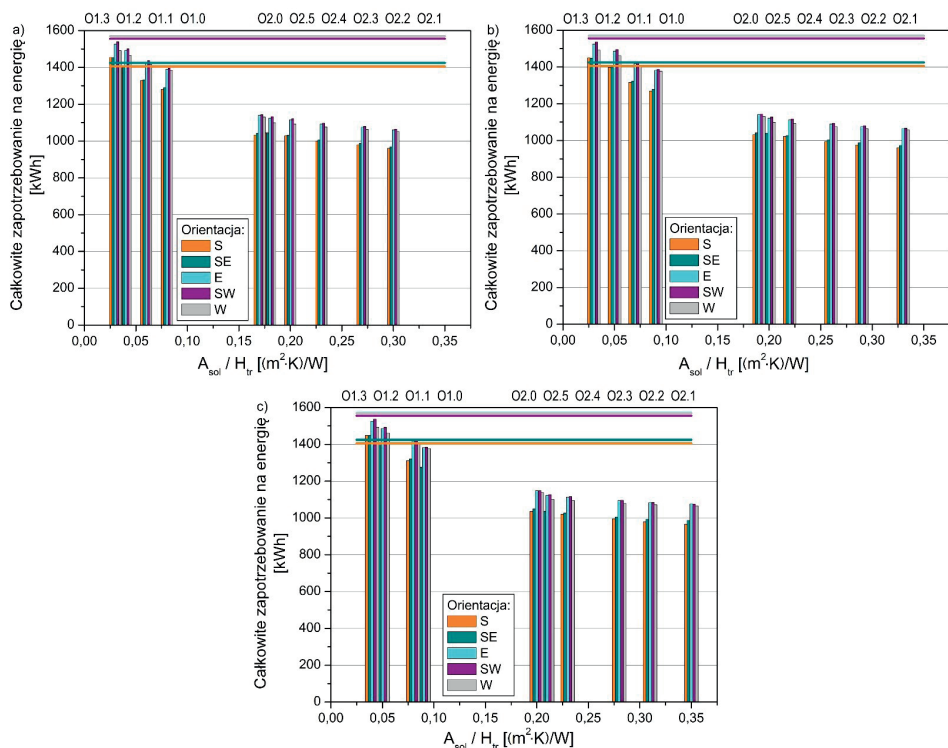
|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 7.  | O 2.2 | 60,5  | 161,0 | 267,9 | 35,7  | 109,4 | 188,2 | 21,5  | 69,8  | 123,9 | 21,0  | 69,1  | 117,9 | 17,7  | 51,0  | 87,1  |
| 8.  | O 2.3 | 9,7   | 70,1  | 139,2 | -2,2  | 49,3  | 98,7  | -1,3  | 29,9  | 67,1  | -5,6  | 23,5  | 56,1  | -0,2  | 19,5  | 41,8  |
| 9.  | O 2.4 | -29,6 | -2,1  | 29,6  | -31,3 | -10,9 | 14,1  | -19,8 | -3,5  | 13,3  | -28,6 | -13,5 | 2,4   | -19,1 | -6,8  | 4,7   |
| 10. | O 2.5 | -45,3 | -27,0 | -9,0  | -44,5 | -30,2 | -16,7 | -28,6 | -17,6 | -7,4  | -38,6 | -27,8 | -17,5 | -27,2 | -18,4 | -10,0 |

Całkowite zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu stale maleje wraz ze wzrostem stosunku  $A_{sol}/H_{tr}$ , w odróżnieniu od strefy 2 gdzie osiąga ono minimum dla oszklei pośrednich (rys. 6.11). Najmniejsze wielkości uzyskano w przypadku orientacji południowej balkonu, dzięki najmniejszym składowym zapotrzebowania na ogrzewanie i chłodzenie. Spośród wszystkich typów oszkleń najlepszym okazał się zestaw dwuszybowy z szybami powlekаныmi o najwyższej przepuszczalności promieniowania (O 2.1), w obudowie izolowanej termicznie, bez względu na wysokość oszkleń czy orientację balkonu.

W prawie wszystkich wariantach zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło miało większy wpływ na ograniczenie całkowitych potrzeb energetycznych niż wzrost potrzeb chłodniczych, tak więc efekt końcowy zabudowy balkonu okazał się korzystny. Zapotrzebowanie na energię w najlepszym przypadku udało się zmniejszyć o prawie 33% w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym (tabela 6.10). Wzrost zapotrzebowania na energię w porównaniu z wersją bazową mieszkania występuje tylko dla oszkleń O 1.3 w obudowie lekkiej, w sytuacji kiedy balkon skierowany jest na południe lub południowy wschód. Wynika to z ograniczenia zysków słonecznych i zwiększenia zapotrzebowania na ciepło w strefie 2 na skutek małej przepuszczalności promieniowania przez oszkleń obudowy.

**Tabela 6.10.** Zmiana całkowitego zapotrzebowania na energię w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2 i 3, mieszkanie w części środkowej budynku, oszkleń na 3 ścianach balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszkleń | Orientacja balkonu |       |       |                  |       |       |                  |       |       |                  |       |       |                  |       |       |
|-----|-------------|--------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
|     |             | S                  |       |       | SE               |       |       | E                |       |       | SW               |       |       | W                |       |       |
|     |             | Wys. oszkleń [m]   |       |       | Wys. oszkleń [m] |       |       | Wys. oszkleń [m] |       |       | Wys. oszkleń [m] |       |       | Wys. oszkleń [m] |       |       |
|     |             | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80             | 2,20  | 2,60  | 1,80             | 2,20  | 2,60  | 1,80             | 2,20  | 2,60  | 1,80             | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0       | -8,8               | -9,7  | -10,0 | -9,5             | -10,3 | -10,4 | -11,5            | -12,0 | -12,0 | -10,2            | -10,9 | -10,9 | -11,8            | -12,2 | -12,3 |
| 2.  | O 1.1       | -5,4               | -6,3  | -6,7  | -6,4             | -7,2  | -7,3  | -9,1             | -9,7  | -9,7  | -7,6             | -8,3  | -8,5  | -9,9             | -10,3 | -10,3 |
| 3.  | O 1.2       | 0,0                | -0,6  | -0,9  | -1,2             | -1,8  | -2,0  | -5,0             | -5,3  | -5,4  | -3,5             | -3,9  | -4,0  | -6,6             | -6,8  | -6,8  |
| 4.  | O 1.3       | 3,5                | 3,1   | 3,1   | 2,0              | 1,7   | 1,6   | -2,8             | -2,9  | -2,8  | -1,1             | -1,2  | -1,2  | -4,9             | -5,0  | -4,8  |
| 5.  | O 2.0       | -26,5              | -26,7 | -26,3 | -26,8            | -26,9 | -26,3 | -27,3            | -27,3 | -26,9 | -26,5            | -26,5 | -26,1 | -27,9            | -27,9 | -27,5 |
| 6.  | O 2.1       | -31,7              | -31,7 | -31,2 | -32,0            | -31,7 | -30,7 | -32,4            | -32,1 | -31,4 | -31,6            | -31,4 | -30,8 | -32,9            | -32,7 | -32,0 |
| 7.  | O 2.2       | -30,3              | -30,6 | -30,4 | -30,7            | -30,8 | -30,3 | -31,5            | -31,5 | -31,0 | -30,5            | -30,6 | -30,3 | -32,2            | -32,1 | -31,7 |
| 8.  | O 2.3       | -28,8              | -29,3 | -29,2 | -29,4            | -29,6 | -29,4 | -30,5            | -30,6 | -30,3 | -29,4            | -29,7 | -29,5 | -31,4            | -31,5 | -31,2 |
| 9.  | O 2.4       | -26,8              | -27,2 | -27,4 | -27,6            | -28,0 | -28,0 | -29,0            | -29,2 | -29,1 | -27,9            | -28,2 | -28,2 | -30,4            | -30,4 | -30,2 |
| 10. | O 2.5       | -25,7              | -26,2 | -26,4 | -26,6            | -27,0 | -27,2 | -28,3            | -28,5 | -28,5 | -27,2            | -27,5 | -27,5 | -29,9            | -30,0 | -29,8 |



**Rys. 6.11.** Całkowite zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklelenie na 3 ścianach obudowy, wysokość oszklelenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

## 6.2.2. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklelenie na jednej ścianie obudowy balkonu

### Strefa 2

Obudowy o niskiej izolacyjności termicznej z szybami pojedynczymi są mniej efektywne w konwersji promieniowania słonecznego niż obudowy o wyższej izolacyjności termicznej z oszkleceniami podwójnymi. W większości przypadków zabudowa balkonów przynosi pozytywne efekty energetyczne (tabela 6.11), a jedynie przy zastosowaniu oszklelenia O 1.3 zapotrzebowanie na ciepło nieznacznie przekracza poziom uzyskany w pomieszczeniu z balkonem otwartym skierowanym na południe lub południowy wschód (od 0,3% do 5,8%). Zwiększenie całkowitej przepuszczalności promieniowania słonecznego i proporcji  $A_{\text{sol}}/H_{\text{tr}}$  (oszklelenie O 1.0) pozwoliło ograniczyć zapotrzebowanie na ciepło średnio o 28% w stosunku

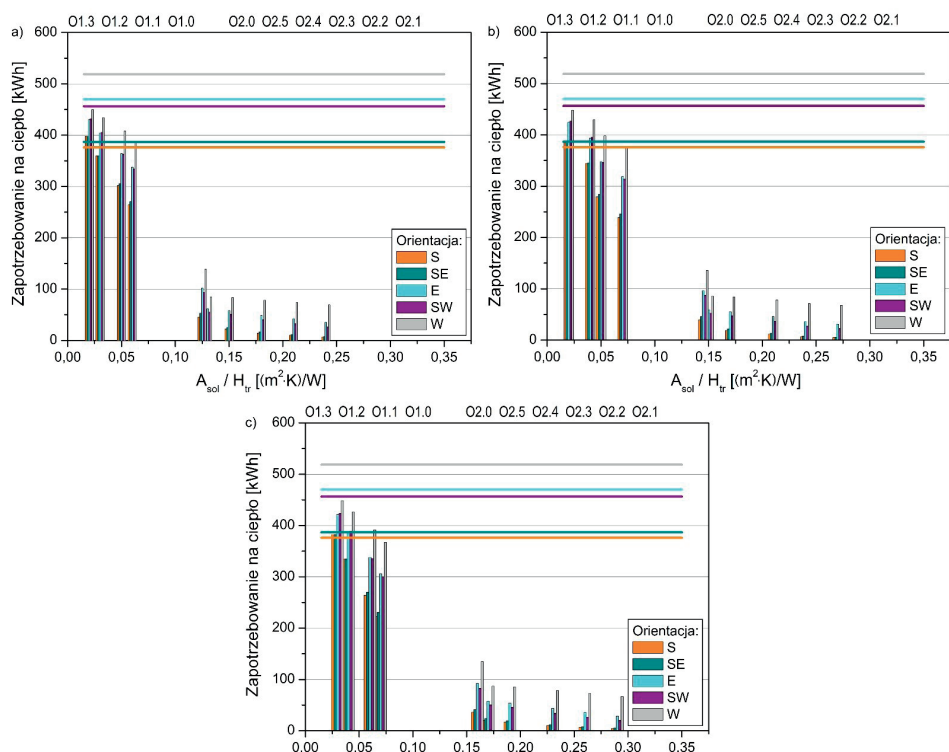
do oszklenia O 1.3. W grupie oszkleń dwuszybowych średnia różnica pomiędzy zapotrzebowaniem na energię w skrajnych przypadkach (oszklenia O 2.0 i O 2.1) wynosi 73%. Zastosowanie oszklenia o największej wysokości (2,60 m) jest na ogół najbardziej skutecznym rozwiązaniem. Jedynie dla orientacji zachodniej spadek zapotrzebowania na ciepło jest największy dla oszkleń od O 2.2 do O 2.5 o wysokości 1,80 lub 2,20 m.

Wraz ze wzrostem proporcji  $A_{sol}/H_{tr}$  zapotrzebowanie na ciepło maleje dla wszystkich wysokości i kierunków oszklenia. Podobnie jak w przypadku balkonu oszklonego na trzech ścianach, osiąga ono minimum dla orientacji południowej i południowo-wschodniej, a maksimum dla orientacji zachodniej (rys. 6.12). Zmiana położenia balkonu względem kierunku południowego daje najmniejszy efekt wśród oszkleń jednoszybowych w obudowie nieizolowanej – wzrost zapotrzebowania na ciepło wynosi od 13% (oszklenie typu O 1.3, wysokość 1,80 m) do 65% (oszklenie typu O 1.0, wysokość 2,60 m). Wśród obudów izolowanych z oszkleniami dwuszybowymi zapotrzebowanie na ciepło może wzrosnąć od dwu- do ponad trzynastokrotnie (odpowiednio dla oszklenia typu O 2.0 o wysokości 1,80 m i oszklenia typu O 2.1 o wysokości 2,60 m) jeżeli balkon skierowany zostanie na zachód.

**Tabela 6.11.** Zmiana zapotrzebowania na ciepło w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

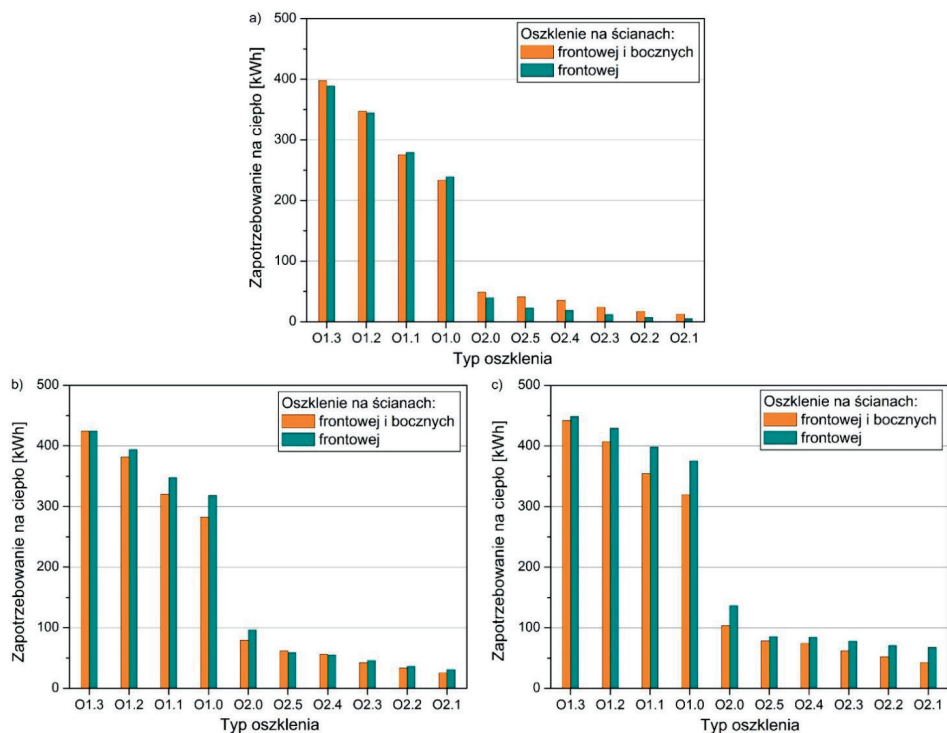
| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -29,7              | -36,5 | -40,9 | -30,1              | -36,3 | -40,3 | -28,2              | -32,3 | -34,9 | -26,8              | -31,3 | -34,3 | -25,1              | -27,6 | -29,2 |
| 2.  | O 1.1         | -19,8              | -25,7 | -29,7 | -21,1              | -26,6 | -30,2 | -22,5              | -26,0 | -28,2 | -20,4              | -24,1 | -26,5 | -21,3              | -23,3 | -24,5 |
| 3.  | O 1.2         | -4,4               | -8,4  | -11,2 | -6,9               | -10,9 | -13,4 | -14,0              | -16,2 | -17,6 | -11,2              | -13,4 | -14,8 | -16,3              | -17,2 | -17,8 |
| 4.  | O 1.3         | 5,8                | 3,3   | 1,7   | 2,7                | 0,3   | -1,3  | -8,5               | -9,7  | -10,3 | -5,4               | -6,5  | -7,1  | -13,3              | -13,5 | -13,6 |
| 5.  | O 2.0         | -87,8              | -89,4 | -90,4 | -86,3              | -88,1 | -89,3 | -78,2              | -79,5 | -80,5 | -79,5              | -80,8 | -81,8 | -73,3              | -73,7 | -74,1 |
| 6.  | O 2.1         | -98,2              | -98,6 | -98,8 | -98,1              | -98,5 | -98,7 | -92,5              | -93,4 | -94,0 | -94,2              | -95,1 | -95,6 | -86,7              | -87,0 | -87,1 |
| 7.  | O 2.2         | -97,3              | -98,1 | -98,2 | -97,1              | -98,0 | -98,0 | -91,0              | -92,3 | -92,4 | -92,8              | -94,1 | -94,2 | -85,7              | -86,3 | -86,0 |
| 8.  | O 2.3         | -96,2              | -96,9 | -97,3 | -95,8              | -96,6 | -97,0 | -89,6              | -90,3 | -90,7 | -91,2              | -92,0 | -92,5 | -84,9              | -84,9 | -84,9 |
| 9.  | O 2.4         | -94,1              | -95,0 | -95,6 | -93,5              | -94,4 | -95,0 | -87,7              | -88,2 | -88,5 | -88,9              | -89,6 | -90,0 | -83,8              | -83,7 | -83,5 |
| 10. | O 2.5         | -93,0              | -93,9 | -94,5 | -92,3              | -93,3 | -93,9 | -87,0              | -87,4 | -87,7 | -87,9              | -88,5 | -88,9 | -83,6              | -83,5 | -83,3 |





**Rys. 6.12.** Zapotrzebowanie na ciepło w strefie 2 w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

Zmiana rozmieszczenia oszklenia może powodować różne efekty. Jeżeli balkon skierowany jest na południe, oszklone ściany boczne są przyczyną zwiększonych strat ciepła, a zastąpienie ich przegrodami pełnymi o większej izolacyjności cieplnej zmniejsza zapotrzebowanie na ciepło od około 10% do 64%, odpowiednio dla oszkleń O 2.0 i O 2.1. Podobne zależności występują dla orientacji południowo-wschodniej i południowo-zachodniej (przy mniejszej przepuszczalności promieniowania). Spadek zapotrzebowania na ciepło w związku z usunięciem oszklenia na ścianach bocznych występuje też w kilku przypadkach obudów nieizolowanych z oszkleniami jednoszybowymi. Dotyczy to jedynie balkonów skierowanych na południe o wysokości 2,20 m (oszklenia O 1.2 i O 1.3) i 2,60 (wszystkie oszklenia). Zmiana zapotrzebowania na energię jest raczej niewielka i wynosi od 1% do 7%. W pozostałych sytuacjach, jeżeli oszklona jest jedynie ściana frontowa skuteczność pozyskiwania energii na ogół maleje, a zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniu rośnie w porównaniu z pomieszczeniem sąsiadującym z balkonem oszklonym na trzech ścianach (rys. 6.13).

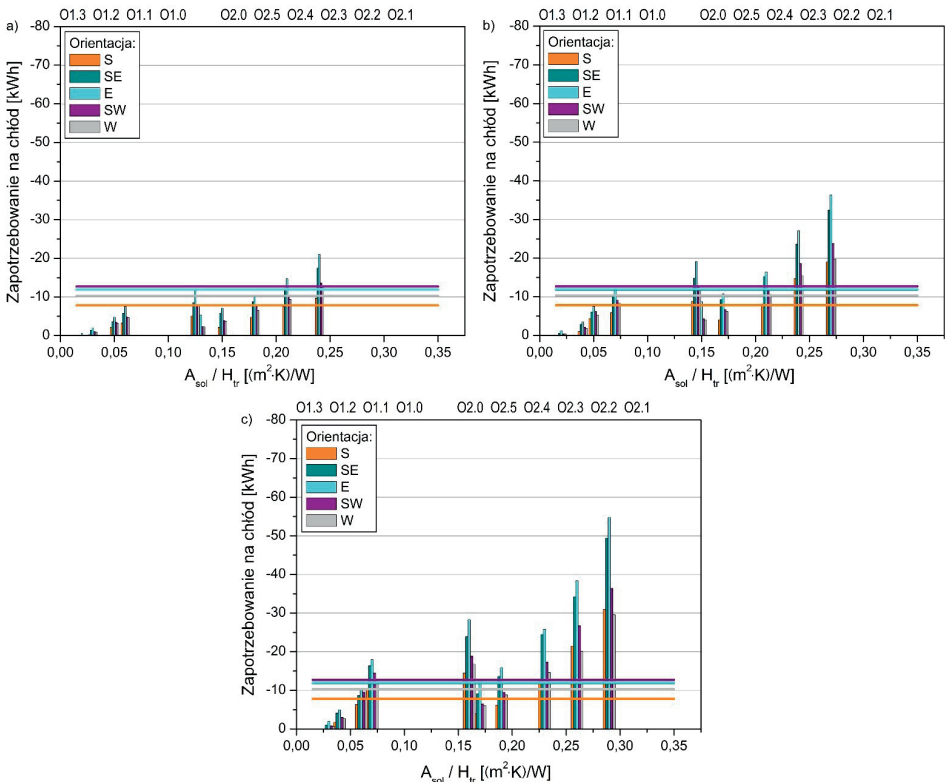


**Rys. 6.13.** Zapotrzebowanie na ciepło w strefie 2 w zależności od liczby oszklonych ścian obudowy. Mieszkanie w części środkowej budynku, wysokość oszkleń 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

Południowa orientacja balkonu jest również najlepsza pod względem zapotrzebowania na chłód (rys. 6.14). Najgorsze wyniki otrzymano dla kierunku wschodniego i południowo-wschodniego, o największym napromieniowaniu oszkleń (tabela 6.12). Skrajna zmiana położenia balkonu względem orientacji najbardziej korzystnej może zwiększyć zapotrzebowanie na chłód od około 61% do 814% (obudowy nieizolowane z oszklaceniami jednoszybowymi), i od 77% do około 350% (obudowy izolowane z oszklaceniami dwuszybowymi). Największe zmiany procentowe mogą być nieco mylące, gdyż odnoszą się do niewielkich wartości samego zapotrzebowania na energię (rosnącego od np. 0,2 do 1,9 kWh), i tak naprawdę nie świadczą o istotnej potrzebie chłodzenia pomieszczeń.

Dzięki zabudowom z oszklaceniami pojedynczymi udało się zmniejszyć zapotrzebowanie na chłód (w porównaniu z pokojem z balkonem otwartym) w 90% wariantów, głównie poprzez zmniejszenie zysków słonecznych w pomieszczeniu mieszkalnym. Jedynie oszkleń O 1.0 (o największej przepuszczalności promieniowania) zwiększa potrzeby energetyczne, jeżeli zastosowano je na dużej powierzchni. Wśród oszkleń dwuszybowych proporcje są mniej korzystne – ponad

50% rozwiązań przyczyniło się do wzrostu zapotrzebowania na chłód. Dotyczy to przede wszystkim zabudów z oszkleniami o przepuszczalności promieniowania większej niż 0,5.



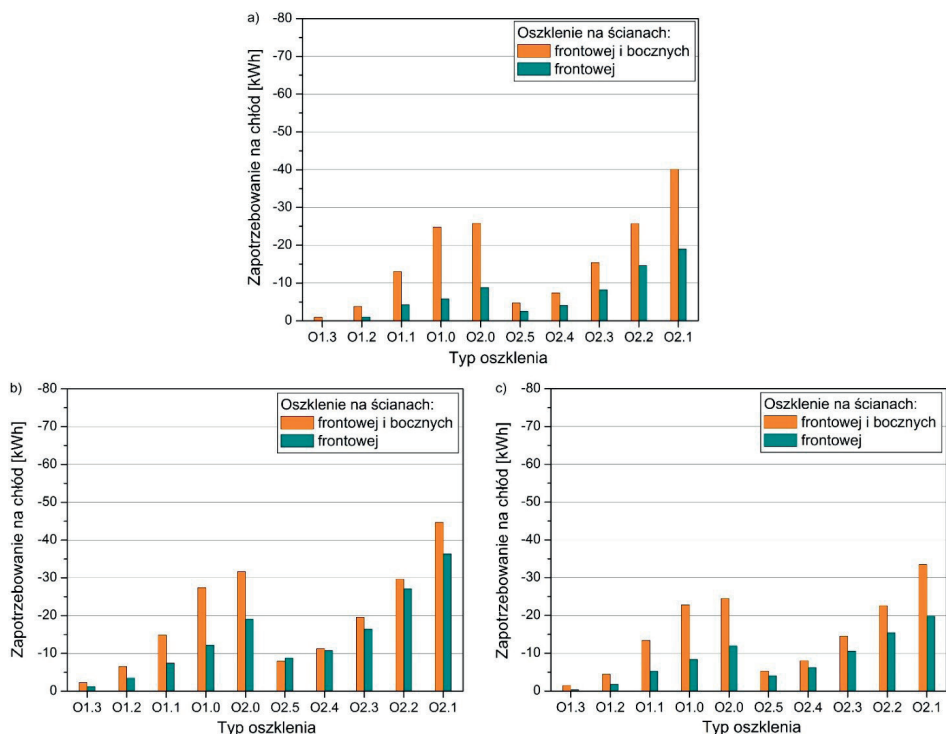
**Rys. 6.14.** Zapotrzebowanie na chłód w strefie 2 w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonom, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

**Tabela 6.12.** Zmiana zapotrzebowania na chłód w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -58,5              | -24,9 | 32,4  | -51,2              | -14,5 | 37,6  | -37,8              | 1,4   | 49,7  | -62,3              | -28,2 | 14,0  | -54,9              | -19,1 | 23,2  |
| 2.  | O 1.1         | -71,8              | -45,1 | -19,4 | -69,9              | -49,0 | -26,8 | -60,6              | -37,7 | -15,5 | -72,6              | -51,4 | -24,6 | -70,0              | -48,9 | -24,6 |

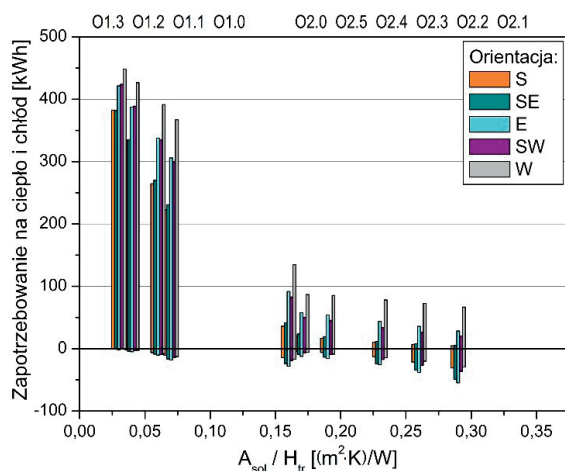
|     |       |        |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3.  | O 1.2 | -97,3  | -87,2  | -77,9 | -88,2 | -76,2 | -65,1 | -84,0 | -71,2 | -59,3 | -91,9 | -83,7 | -76,0 | -91,7 | -82,8 | -74,2 |
| 4.  | O 1.3 | -100,0 | -100,0 | -99,0 | -99,2 | -95,6 | -91,3 | -95,5 | -89,8 | -84,1 | -99,6 | -96,7 | -93,6 | -99,4 | -96,6 | -93,5 |
| 5.  | O 2.0 | -35,0  | 13,1   | 85,3  | -28,3 | 24,3  | 100,8 | 1,4   | 58,8  | 135,3 | -40,2 | 0,7   | 48,5  | -25,0 | 15,8  | 63,0  |
| 6.  | O 2.1 | 24,7   | 143,7  | 296,7 | 46,8  | 172,7 | 315,4 | 75,2  | 203,0 | 356,3 | 7,2   | 87,2  | 186,7 | 20,9  | 91,7  | 187,0 |
| 7.  | O 2.2 | -3,6   | 87,7   | 175,1 | -2,0  | 98,2  | 187,4 | 22,5  | 125,5 | 219,7 | -16,9 | 46,1  | 110,4 | -9,0  | 49,3  | 95,8  |
| 8.  | O 2.3 | -39,2  | 4,4    | 65,6  | -26,6 | 27,8  | 105,5 | -16,3 | 36,7  | 115,0 | -41,3 | -5,3  | 36,6  | -36,0 | 2,8   | 42,4  |
| 9.  | O 2.4 | -72,3  | -48,1  | -20,3 | -51,1 | -22,1 | 14,4  | -41,1 | -10,3 | 31,9  | -69,2 | -47,6 | -25,0 | -64,0 | -39,7 | -14,5 |
| 10. | O 2.5 | -84,9  | -68,2  | -49,1 | -68,0 | -46,6 | -23,6 | -55,5 | -26,8 | 4,2   | -81,3 | -65,9 | -48,9 | -78,3 | -60,8 | -41,6 |

Pomieszczenia sąsiadujące z balkonami oszklonymi tylko na jednej ścianie obudowy wymagają mniej intensywnego chłodzenia (rys. 6.15), poza pojedynczymi przypadkami dotyczącymi oszkleń o najmniejszej przepuszczalności promieniowania słonecznego O 2.5 (balkon skierowany na wschód). Wśród obudów lekkich z oszkleniami jednoszybowymi różnice te (w odniesieniu do wartości większej, czyli zapotrzebowania na chłód uzyskanego przy oszkleeniu trzech ścian obudowy) wynoszą od 33% do 100%, a w grupie obudów z oszkleniami podwójnymi - od 1% do 68%.



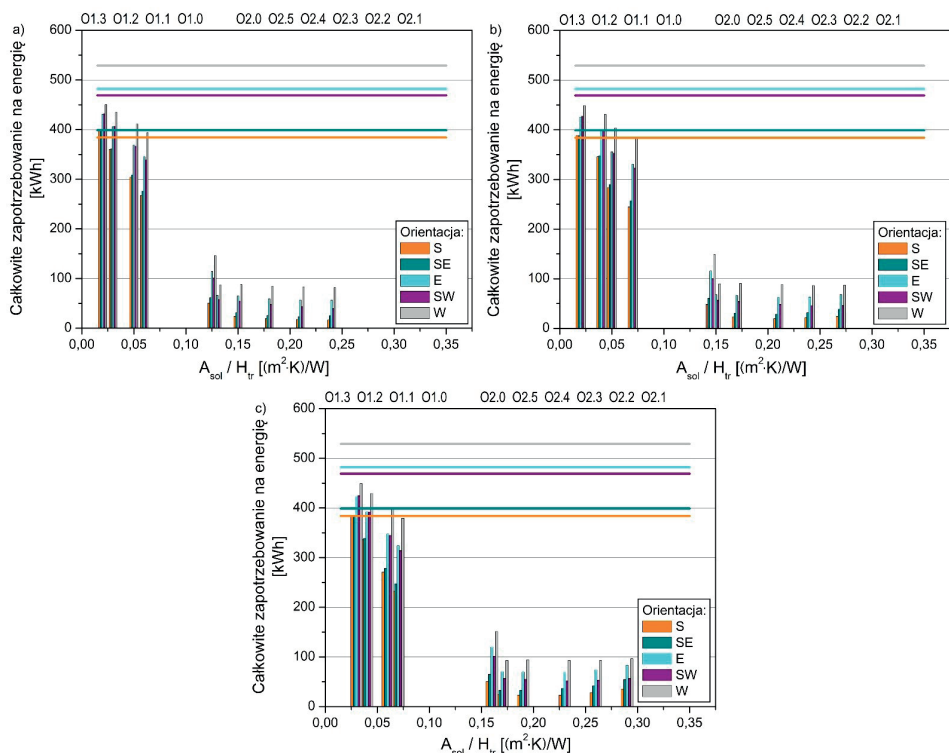
**Rys. 6.15.** Zapotrzebowanie na chłód w strefie 2 w zależności od liczby oszklonych ścian obudowy. Mieszkanie w części środkowej budynku, wysokość oszkleń 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

Udział zapotrzebowania na chłód w całkowitym zapotrzebowaniu na energię różni się znacznie w zależności od rodzaju zabudowy balkonu, tak jak miało to miejsce jeżeli oszklone były wszystkie ściany obudowy (rys. 6.16). Dla obudów z oszkleniami pojedynczymi nie przekracza on 7% (oszklenie O 1.0, wysokość 2,60 m, orientacja SE), podczas gdy dla obudów z oszkleniami podwójnymi sięga ponad 90% (oszklenie O 2.1, wysokość 2,60 m, orientacja SE). Zastosowanie oszkleń powlekanych o przepuszczalności promieniowania ponad 0,5 (O 2.1, O 2.2, O 2.3) może powodować, że zapotrzebowanie na chłód przewyższy zapotrzebowanie na ciepło, szczególnie jeżeli mają one większą wysokość (2,20 lub 2,60 m).



**Rys. 6.16.** Proporcje zapotrzebowania na ciepło i chłód w strefie 2. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia 2,60 m.

Maksimum całkowitych potrzeb energetycznych jednoznacznie wiąże się z zastosowaniem oszklenia pojedynczego typu O 1.3 w obudowie nieizolowanej termicznie (rys. 6.17). Łączne zapotrzebowanie na energię w strefie 2 osiąga minimum dla pośrednich wielkości  $A_{sol}/H_{tr}$  w grupie obudów dobrze izolowanych termicznie – na ogół w zakresie od 0,21 do 0,29 ( $m^2 \cdot K$ )/W (O 2.1, O 2.2, O 2.3). Większa wysokość oszklenia oraz większe nasłonecznienie elewacji powodują zmniejszenie najbardziej korzystnej proporcji  $A_{sol}/H_{tr}$ . Dotyczy to orientacji południowej, południowo-wschodniej i zachodniej, gdzie minimum zapotrzebowania na energię może występować dla obudów z oszkleniami O 2.4 lub O 2.5 (tabela 6.13).



**Rys. 6.17.** Całkowite zapotrzebowanie na energię w strefie 2 w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

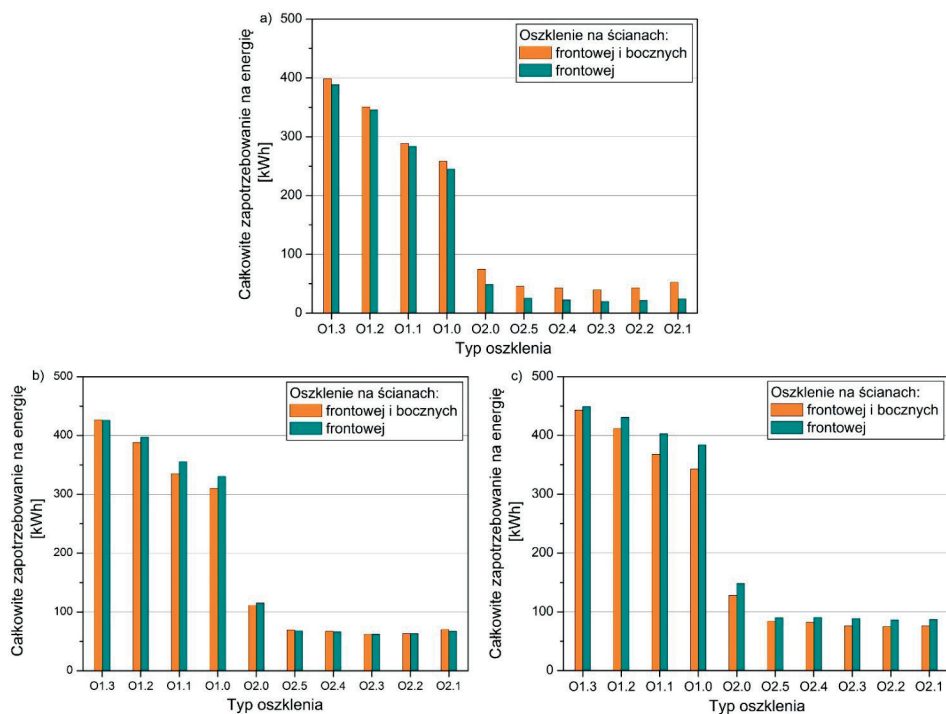
**Tabela 6.13.** Zmiana całkowitego zapotrzebowania na energię w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -30,3              | -36,2 | -39,4 | -30,7              | -35,7 | -38,0 | -28,4              | -31,4 | -32,8 | -27,8              | -31,2 | -32,9 | -25,6              | -27,5 | -28,2 |
| 2.  | O 1.1         | -20,8              | -26,1 | -29,5 | -22,6              | -27,3 | -30,1 | -23,4              | -26,3 | -27,9 | -21,8              | -24,8 | -26,5 | -22,3              | -23,8 | -24,5 |
| 3.  | O 1.2         | -6,3               | -10,0 | -12,5 | -9,4               | -12,8 | -15,0 | -15,7              | -17,5 | -18,6 | -13,4              | -15,3 | -16,4 | -17,8              | -18,5 | -18,9 |
| 4.  | O 1.3         | 3,6                | 1,2   | -0,4  | -0,4               | -2,6  | -4,0  | -10,7              | -11,7 | -12,1 | -7,9               | -8,9  | -9,5  | -14,9              | -15,2 | -15,1 |
| 5.  | O 2.0         | -86,8              | -87,4 | -86,9 | -84,6              | -84,8 | -83,7 | -76,3              | -76,1 | -75,1 | -78,5              | -78,6 | -78,3 | -72,3              | -72,0 | -71,4 |
| 6.  | O 2.1         | -95,7              | -93,7 | -90,8 | -93,7              | -90,4 | -86,4 | -88,3              | -86,0 | -82,7 | -91,5              | -90,1 | -87,9 | -84,6              | -83,5 | -81,8 |
| 7.  | O 2.2         | -95,4              | -94,4 | -92,6 | -94,2              | -92,1 | -89,5 | -88,2              | -86,9 | -84,6 | -90,7              | -90,3 | -88,6 | -84,3              | -83,7 | -82,4 |

| Lp. | Typ<br>oszkle-<br>nia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|-----------------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |                       | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |                       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |                       | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 8.  | O 2.3                 | -95,1              | -94,8 | -94,0 | -93,7              | -92,8 | -91,0 | -87,8              | -87,1 | -85,6 | -89,8              | -89,6 | -89,0 | -84,0              | -83,2 | -82,4 |
| 9.  | O 2.4                 | -93,7              | -94,1 | -94,0 | -92,2              | -92,3 | -91,8 | -86,6              | -86,3 | -85,5 | -88,3              | -88,4 | -88,3 | -83,5              | -82,9 | -82,2 |
| 10. | O 2.5                 | -92,8              | -93,4 | -93,6 | -91,6              | -91,9 | -91,8 | -86,2              | -85,9 | -85,4 | -87,7              | -87,9 | -87,9 | -83,5              | -83,0 | -82,4 |

Całkowite zapotrzebowanie na energię w strefie 2 (w porównaniu z pokojem sąsiadującym z balkonem oszklonym na trzech ścianach) jest uzależnione od udziału zapotrzebowania na ciepło i chłód. Jeżeli przyjrzymy się balkonom skierowanym na południe, zastąpienie oszkleń na ścianach bocznych przegrodami pełnymi pozwala zmniejszyć potrzeby energetyczne przede wszystkim dzięki mniejszemu przegrzewaniu w okresie chłodniczym (rys. 6.18). Odwrotna sytuacja ma miejsce jeżeli balkon skierowany jest na wschód lub zachód – tutaj oszklenie na trzech ścianach zmniejsza zapotrzebowanie na ciepło w sezonie grzewczym na tyle, że konieczność bardziej intensywnego chłodzenia w lecie staje się czynnikiem o mniejszym znaczeniu. Wyniki uzyskane dla balkonów z obudową izolowaną skierowanych na wschód nie są jednoznaczne, i niewielką przewagę w kształtowaniu całkowitego zapotrzebowania na energię może wykazywać sezon grzewczy lub chłodniczy (rys. 6.18.b).





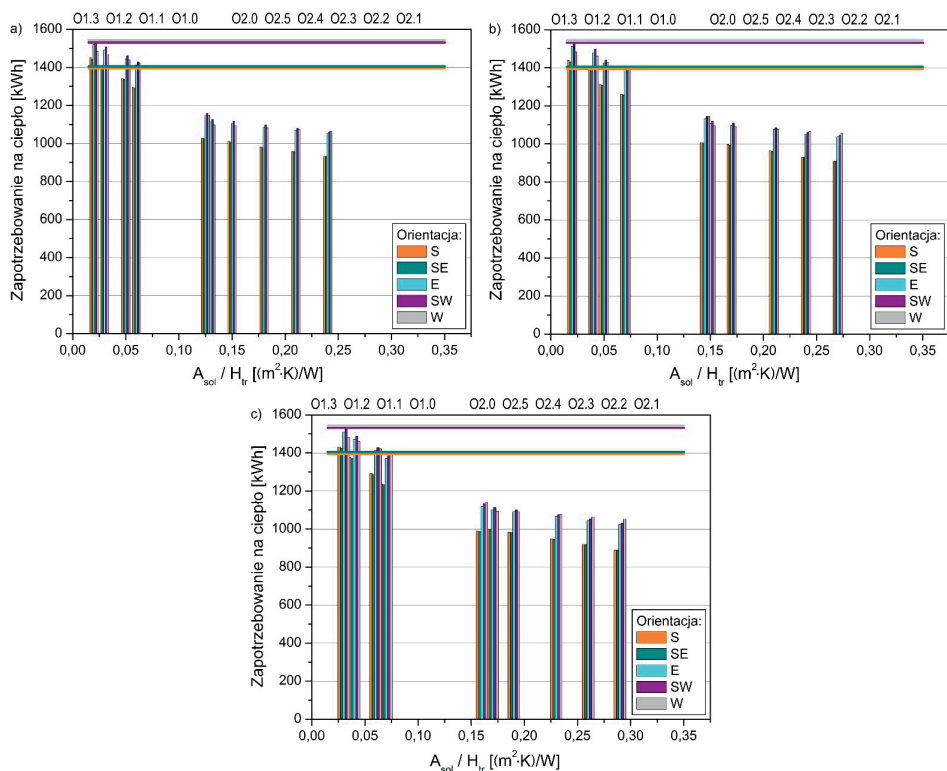
**Rys. 6.18.** Całkowite zapotrzebowanie na energię w strefie 2 w zależności od liczby oszklwionych ścian obudowy. Mieszkanie w części środkowej budynku, wysokość oszklwienia 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

### Strefa 2 i 3

W 95% spośród analizowanych wariantów dzięki zabudowie balkonu można zmniejszyć zapotrzebowanie na ciepło w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym (tabela 6.14). Najbardziej skuteczne są obudowy z oszkleniem podwójnym – dzięki ich zastosowaniu ograniczono zapotrzebowanie na energię od około 24% do około 37%. Obudowy o małej izolacyjności z oszkleniem pojedynczym należy ocenić jako mniej skuteczne – ich zastosowanie zmniejszyło zapotrzebowanie na ciepło w najlepszej sytuacji o około 12% (oszklwienie O 1.0, wysokość 2,60 m, orientacja południowo-wschodnia). Zapotrzebowanie na ciepło wzrosło ponad poziom bazowy na skutek zastosowania oszklwienia O 1.3 (jeżeli balkon skierowany jest na południe i południowy wschód), i w pojedynczym przypadku – oszklwienia O 1.2.

Zapotrzebowanie na energię na cele grzewcze jest najmniejsze, jeżeli balkon skierowany jest na południowy wschód lub południe, przy czym różnice pomiędzy tymi kierunkami nie przekraczają 0,6%. W większości przypadków największe

zapotrzebowanie na energię występuje dla orientacji o mniejszym napromienianiu, czyli południowo-zachodniej, ewentualnie wschodniej lub zachodniej (rys. 6.19). Zmiany wynikające z obrotu mieszkania względem stron świata są nieco większe niż te uzyskane dla obudowy oszklonej na trzech ścianach. W porównaniu z orientacją południowo-wschodnią zapotrzebowanie na ciepło może wzrosnąć maksymalnie od 6,5% do 12,5% (obudowy nieizolowane z oszkleniami jednoszybowymi), i od 10% do 16% (obudowy izolowane z oszkleniami podwójnymi).

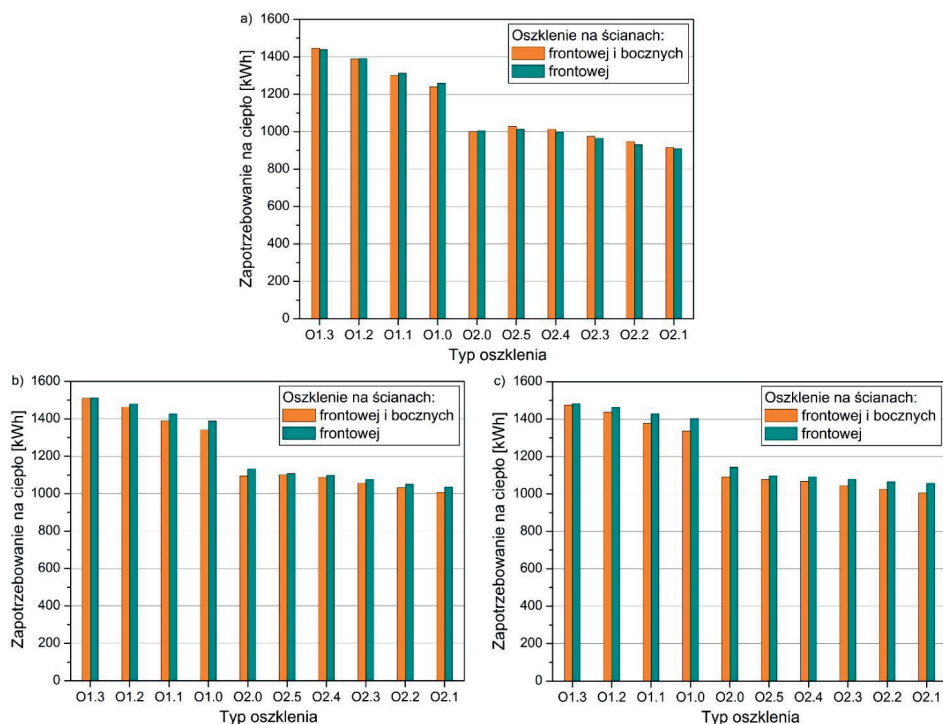


**Rys. 6.19.** Zapotrzebowanie na ciepło w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

**Tabela 6.14.** Zmiana zapotrzebowania na ciepło w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2 i 3, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -7,1               | -9,6  | -11,4 | -8,0               | -10,5 | -12,3 | -8,4               | -10,1 | -11,2 | -6,7               | -8,4  | -9,6  | -8,0               | -9,0  | -9,7  |
| 2.  | O 1.1         | -3,8               | -5,8  | -7,3  | -4,9               | -6,9  | -8,3  | -6,4               | -7,7  | -8,6  | -4,6               | -5,9  | -6,8  | -6,6               | -7,4  | -7,9  |
| 3.  | O 1.2         | 1,0                | -0,3  | -1,2  | -0,3               | -1,6  | -2,5  | -3,4               | -4,2  | -4,7  | -1,5               | -2,3  | -2,8  | -4,8               | -5,2  | -5,4  |
| 4.  | O 1.3         | 4,0                | 3,2   | 2,7   | 2,7                | 1,9   | 1,4   | -1,6               | -2,0  | -2,3  | 0,3                | -0,1  | -0,3  | -3,7               | -3,8  | -3,9  |
| 5.  | O 2.0         | -26,5              | -27,9 | -29,1 | -27,0              | -28,5 | -29,7 | -25,8              | -26,7 | -27,5 | -24,4              | -25,2 | -26,0 | -25,4              | -25,9 | -26,2 |
| 6.  | O 2.1         | -33,1              | -34,8 | -36,2 | -33,7              | -35,3 | -36,7 | -31,8              | -32,9 | -33,7 | -30,7              | -31,8 | -32,6 | -31,0              | -31,5 | -31,8 |
| 7.  | O 2.2         | -31,2              | -33,3 | -34,1 | -31,9              | -33,9 | -34,7 | -30,7              | -31,9 | -32,3 | -29,5              | -30,8 | -31,2 | -30,4              | -31,0 | -31,0 |
| 8.  | O 2.3         | -29,5              | -30,9 | -32,0 | -30,3              | -31,6 | -32,7 | -29,6              | -30,4 | -31,0 | -28,4              | -29,2 | -29,8 | -29,8              | -30,1 | -30,3 |
| 9.  | O 2.4         | -27,4              | -28,6 | -29,5 | -28,2              | -29,3 | -30,2 | -28,3              | -28,9 | -29,4 | -27,0              | -27,6 | -28,1 | -29,1              | -29,2 | -29,3 |
| 10. | O 2.5         | -26,4              | -27,4 | -28,2 | -27,2              | -28,2 | -29,0 | -27,8              | -28,3 | -28,7 | -26,4              | -26,9 | -27,3 | -28,9              | -29,0 | -29,1 |

Jeżeli porównamy zapotrzebowanie na ciepło w całym mieszkaniu, różnice wynikające z rozmieszczenia oszklenia są znacznie mniejsze niż w pomieszczeniu przy balkonie, i nie przekraczają 5% (rys. 6.20). Charakter zmian jest podobny jak w strefie 2, tzn. poza balkonem skierowanym na południe z obudową dobrze izolowaną oszklenie wszystkich ścian skutkuje zmniejszeniem zapotrzebowania na energię.

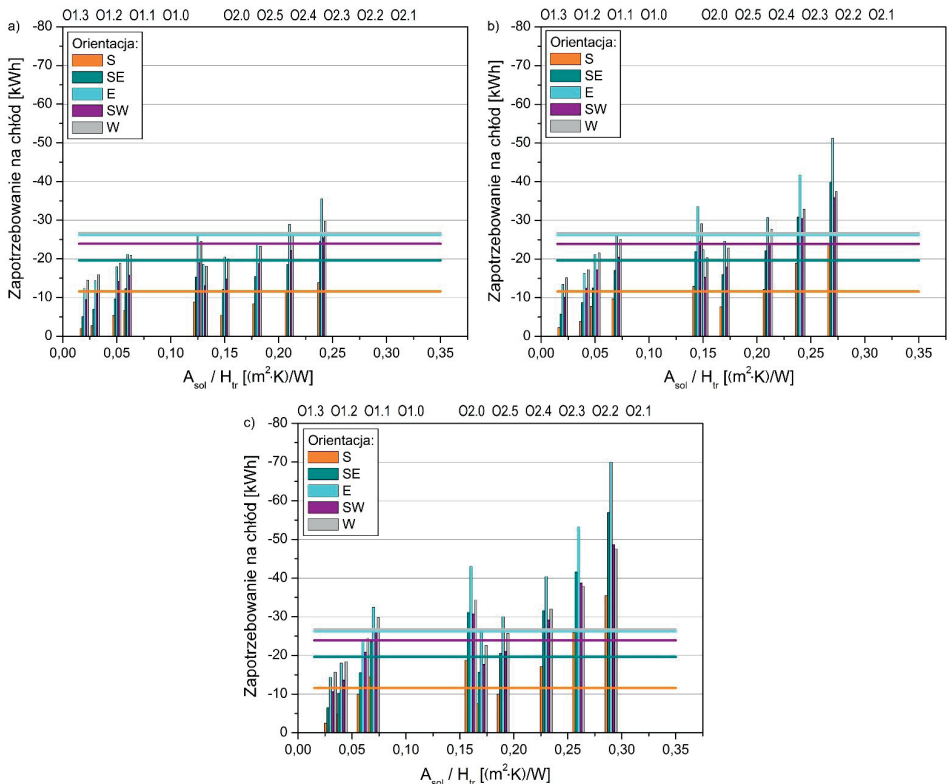


**Rys. 6.20.** Zapotrzebowanie na ciepło w całym mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od liczby oszklonych ścian obudowy. Mieszkanie w części środkowej budynku, wysokość oszklwienia 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

Obudowy z oszkleniem pojedynczym w zdecydowanej większości wariantów pozwalają zmniejszyć zapotrzebowanie na chłód w porównaniu z mieszkaniem z balkonem otwartym (tabela 6.15). Zastosowanie oszkleń podwójnych o przepuszczalności promieniowania mniejszej niż 0,5 także jest rozwiązaniem korzystnym (oszklwienia O 2.5 i O 2.5). Jeżeli przepuszczalność promieniowania jest większa niż 0,5, efekty końcowe będą zależę od wysokości oszklwienia. Dla najmniejszej wysokości w niektórych przypadkach możliwe jest zmniejszenie zapotrzebowania na energię, ale wysokości większe (2,20 i 2,60 m) będą powodować wzrost potrzeb energetycznych.

Zapotrzebowanie na chłód w całym mieszkaniu jest najmniejsze dla orientacji południowej (rys. 6.21). Najgorsze wyniki uzyskano jeżeli ściana frontowa balkonu skierowana jest na zachód (w większości wariantów z oszkleniem pojedynczym) lub na wschód (oszklwienia podwójne). Skrajna zmiana położenia balkonu względem orientacji najbardziej korzystnej zwiększa zapotrzebowanie na chłód od około 126% do 508% (obudowy nieizolowane z oszklzeniami jednoszybowymi),

i od około 97% do 341% (obudowy izolowane z oszkleniami dwuszybowymi). Podobnie jak w poprzednich przypadkach, duże zmiany procentowe dotyczą stosunkowo małych wielkości samego zapotrzebowania na energię.



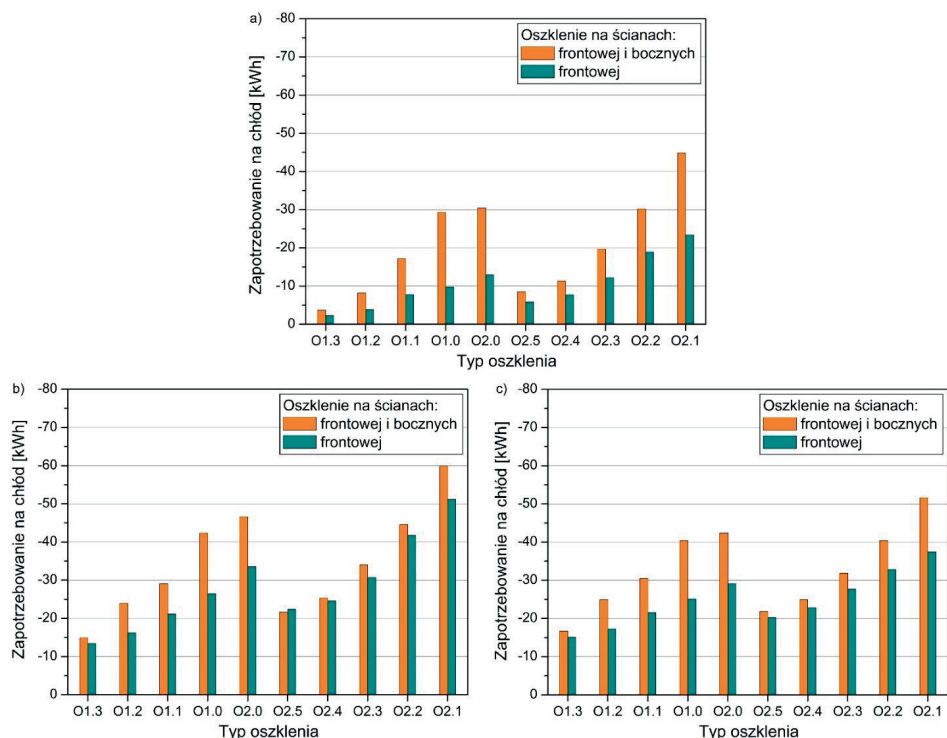
**Rys. 6.21.** Zapotrzebowanie na chłód w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

**Tabela 6.15.** Zmiana zapotrzebowania na chłód w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2 i 3, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszkle-<br>nia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |      |                    |       |       |                    |       |      |
|-----|--------------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|------|
|     |                    | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |      | SW                 |       |       | W                  |       |      |
|     |                    | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |      | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |      |
|     |                    | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60 | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60 |
| 1.  | O 1.0              | -42,3              | -16,2 | 24,4  | -37,3              | -12,9 | 19,8  | -19,2              | 0,7   | 24,0 | -33,8              | -14,1 | 9,4   | -21,8              | -6,2  | 11,3 |
| 2.  | O 1.1              | -53,7              | -32,8 | -13,1 | -50,8              | -36,0 | -21,1 | -31,7              | -19,3 | -7,7 | -40,6              | -27,8 | -12,6 | -29,1              | -19,3 | -8,8 |

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 3.  | O 1.2         | -76,3              | -67,0 | -58,8 | -64,3              | -55,6 | -47,8 | -45,3              | -37,9 | -31,4 | -53,7              | -47,9 | -42,7 | -40,3              | -35,5 | -31,2 |
| 4.  | O 1.3         | -82,5              | -80,4 | -78,0 | -74,1              | -70,5 | -66,9 | -52,9              | -49,0 | -45,4 | -60,2              | -57,5 | -55,2 | -45,7              | -43,5 | -41,5 |
| 5.  | O 2.0         | -23,1              | 11,7  | 62,1  | -22,0              | 11,5  | 58,7  | 0,5                | 28,1  | 64,1  | -20,4              | 2,7   | 28,9  | -8,0               | 9,1   | 28,2  |
| 6.  | O 2.1         | 20,1               | 102,4 | 206,7 | 25,4               | 103,1 | 190,4 | 35,6               | 95,4  | 166,6 | 6,5                | 50,1  | 103,9 | 11,3               | 40,1  | 78,0  |
| 7.  | O 2.2         | -0,7               | 63,4  | 123,5 | -5,2               | 57,0  | 111,9 | 10,5               | 59,3  | 103,2 | -7,1               | 27,6  | 62,5  | -1,2               | 23,0  | 41,6  |
| 8.  | O 2.3         | -27,1              | 4,8   | 47,9  | -21,5              | 13,0  | 61,2  | -8,8               | 17,1  | 54,1  | -21,1              | -0,8  | 22,4  | -13,0              | 3,5   | 19,9  |
| 9.  | O 2.4         | -52,8              | -33,9 | -13,1 | -37,9              | -18,8 | 4,5   | -21,7              | -6,1  | 14,5  | -38,0              | -24,9 | -11,9 | -25,4              | -14,6 | -3,8  |
| 10. | O 2.5         | -63,7              | -49,6 | -34,7 | -49,5              | -35,0 | -19,9 | -29,3              | -14,5 | 0,8   | -45,3              | -35,9 | -25,7 | -32,2              | -24,0 | -15,5 |

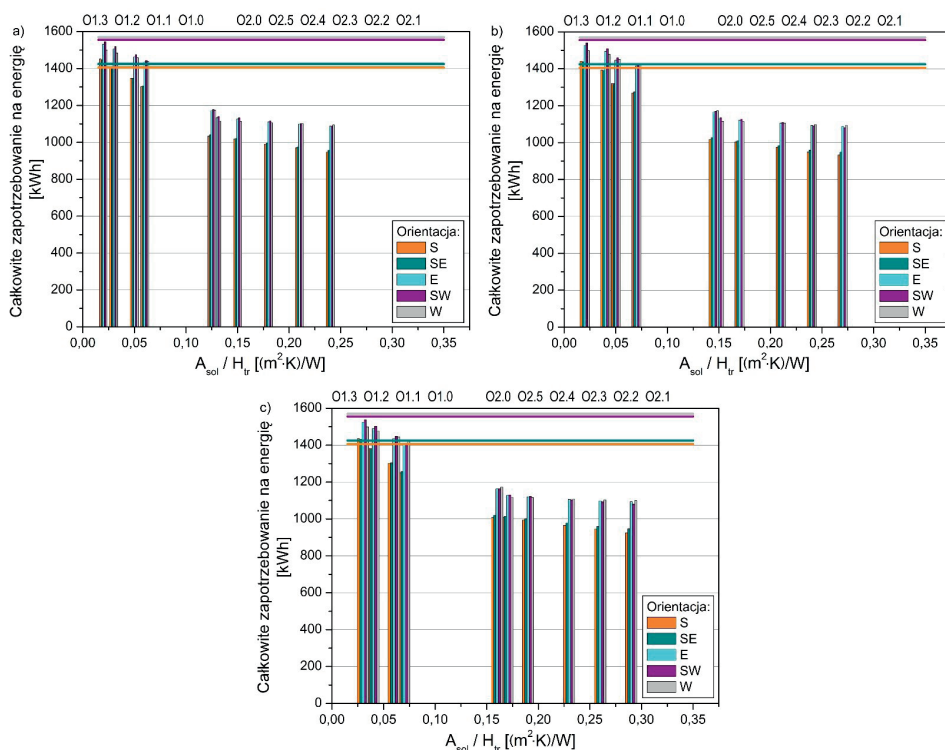
Poza jednym przypadkiem (balkon z obudową izolowaną i oszkleniem O 2.5 skierowany na wschód) usunięcie okien ze ścian bocznych skutkuje zmniejszeniem zapotrzebowania na chłód (rys. 6.22). Efekty są najbardziej zauważalne dla orientacji południowej (od 28% do 67%). Dla kierunku wschodniego i zachodniego zmiany mieszczą się w przedziale od 1% do 38%.



**Rys. 6.22.** Zapotrzebowanie na chłód w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od liczby oszklonych ścian obudowy. Mieszkanie w części środkowej budynku, wysokość oszklenia 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

Całkowite zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu stale maleje wraz ze wzrostem stosunku  $A_{\text{sol}}/H_{\text{tr}}$ , osiągając minimum dla obudowy izolowanej z oszkleniem O 2.1 (rys. 6.23). W odniesieniu do mieszkania z balkonem otwartym największą skuteczność konwersji promieniowania słonecznego uzyskano dla orientacji południowej i maksymalnej wysokości oszklenia, co pozwoliło zmniejszyć zapotrzebowanie na ciepło o 34,2% w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym (tabela 6.16).

W większości analizowanych wariantów całkowite zapotrzebowanie na energię zmalało dzięki zabudowie balkonu, nawet mimo zwiększenia zapotrzebowania na chłodzenie pomieszczeń. Wyjątkiem są obudowy z oszkleniem typu O 1.3 przy orientacji południowej lub południowo-wschodniej, oraz oszklenie O 1.2 o wysokości 1,80 m skierowane na południe.



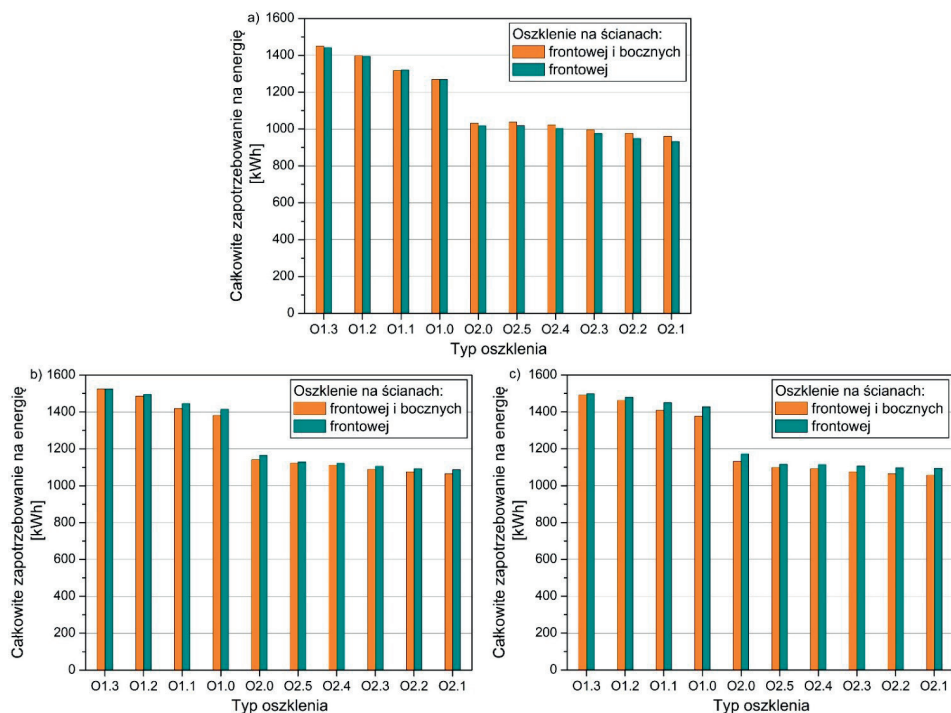
**Rys. 6.23.** Całkowite zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.



**Tabela 6.16.** Zmiana całkowitego zapotrzebowania na energię w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2 i 3, mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -7,4               | -9,7  | -11,1 | -8,4               | -10,6 | -11,8 | -8,6               | -9,9  | -10,6 | -7,1               | -8,5  | -9,3  | -8,2               | -9,0  | -9,3  |
| 2.  | O 1.1         | -4,2               | -6,1  | -7,4  | -5,5               | -7,3  | -8,5  | -6,8               | -7,9  | -8,6  | -5,1               | -6,2  | -6,9  | -7,0               | -7,6  | -7,9  |
| 3.  | O 1.2         | 0,4                | -0,8  | -1,7  | -1,1               | -2,3  | -3,1  | -4,1               | -4,8  | -5,2  | -2,3               | -3,0  | -3,4  | -5,4               | -5,7  | -5,8  |
| 4.  | O 1.3         | 3,3                | 2,6   | 2,1   | 1,6                | 0,9   | 0,4   | -2,5               | -2,8  | -3,0  | -0,6               | -1,0  | -1,1  | -4,4               | -4,5  | -4,5  |
| 5.  | O 2.0         | -26,4              | -27,6 | -28,3 | -27,0              | -28,0 | -28,5 | -25,3              | -25,8 | -25,9 | -24,3              | -24,8 | -25,2 | -25,2              | -25,3 | -25,3 |
| 6.  | O 2.1         | -32,6              | -33,7 | -34,2 | -32,9              | -33,4 | -33,5 | -30,7              | -30,7 | -30,4 | -30,1              | -30,5 | -30,5 | -30,3              | -30,2 | -30,0 |
| 7.  | O 2.2         | -31,0              | -32,5 | -32,8 | -31,6              | -32,6 | -32,6 | -30,0              | -30,4 | -30,1 | -29,2              | -29,9 | -29,8 | -29,9              | -30,0 | -29,8 |
| 8.  | O 2.3         | -29,5              | -30,6 | -31,3 | -30,2              | -31,0 | -31,4 | -29,3              | -29,6 | -29,6 | -28,3              | -28,7 | -29,0 | -29,5              | -29,5 | -29,4 |
| 9.  | O 2.4         | -27,6              | -28,6 | -29,3 | -28,4              | -29,2 | -29,8 | -28,2              | -28,6 | -28,7 | -27,2              | -27,6 | -27,9 | -29,0              | -29,0 | -28,9 |
| 10. | O 2.5         | -26,7              | -27,6 | -28,3 | -27,5              | -28,3 | -28,9 | -27,8              | -28,1 | -28,2 | -26,7              | -27,1 | -27,3 | -28,9              | -28,9 | -28,8 |

Dodanie lub usunięcie oszklenia na ścianach bocznych balkonu powoduje stosunkowo niewielkie zmiany zapotrzebowania na energię (nie przekraczające 4%). W większości przypadków oszklenie na trzech ścianach jest lepszym rozwiązaniem, wyjątkiem są balkony z obudową średnio i dobrze izolowaną skierowane na południe. Tutaj lepsza izolacyjność przegród pełnych okazała się „konkurencyjna” wobec ewentualnych dodatkowych zysków promieniowania przez oszklenia boczne (rys. 6.24).



**Rys. 6.24.** Całkowite zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od liczby oszklwionych ścian obudowy. Mieszkanie w części środkowej budynku, wysokość oszklwienia 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

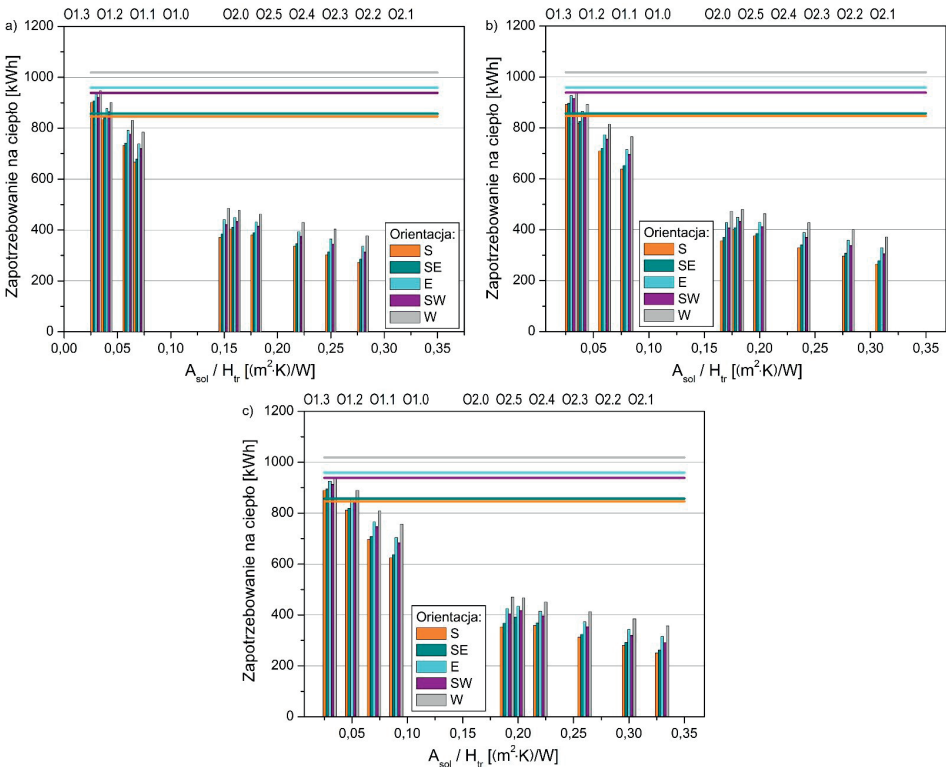
### 6.2.3. Mieszkanie w skrajnej części budynku, oszklwienie na trzech ścianach obudowy balkonu

#### Strefa 2

Zabudowa lekka z oszkleniem jednoszybowym z powłoką spektralnie selektywną o najmniejszej przepuszczalności promieniowania (O 1.3) zwiększa zapotrzebowanie na ciepło w porównaniu z pokojem z balkonem otwartym (średnio o niecałe 6%). Dzięki pozostałym oszklwieniom uzyskano zmniejszenie zapotrzebowania na energię, wynoszące średnio od 1,4% do około 70% w stosunku do zapotrzebowania na ciepło w wersji bazowej. Największe efekty przyniosła obudowa z oszkleniem O 2.1, a najmniejsze – z oszkleniem O 1.3, podobnie jak w większości dotychczas opisywanych przypadków (tabela 6.17).

Tak jak w mieszkaniu położonym w środkowej części budynku, minimum i maksimum potrzeb grzewczych występuje dla kierunku południowego i zachod-

nego (rys. 6.25). Zmiany zapotrzebowania na ciepło związane z obrotem mieszkania względem stron świata wynoszą od około 5% do 30% (obudowy nieizolowane z oszkleniami jednoszybowymi), i od około 18% do 42% (obudowy izolowane z oszkleniami dwuszybowymi), czyli są one mniejsze niż dla analogicznego lokalu z dwiema przegrodami zewnętrznymi.



**Rys. 6.25.** Zapotrzebowanie na ciepło w strefie 2 w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklelenie na 3 ścianach obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonom, linie – w mieszkaniu z balkonom otwartym.

**Tabela 6.17.** Zmiana zapotrzebowania na ciepło w stosunku do mieszkania z balkonom otwartym [%]. Strefa 2, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklelenie na 3 ścianach balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszkle-<br>nia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|--------------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |                    | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |                    | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
| 1.  | O 1.0              | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
|     |                    | -21,2              | -24,5 | -26,3 | -20,8              | -24,0 | -25,6 | -23,0              | -25,5 | -26,6 | -23,2              | -25,8 | -27,2 | -23,0              | -24,9 | -25,7 |

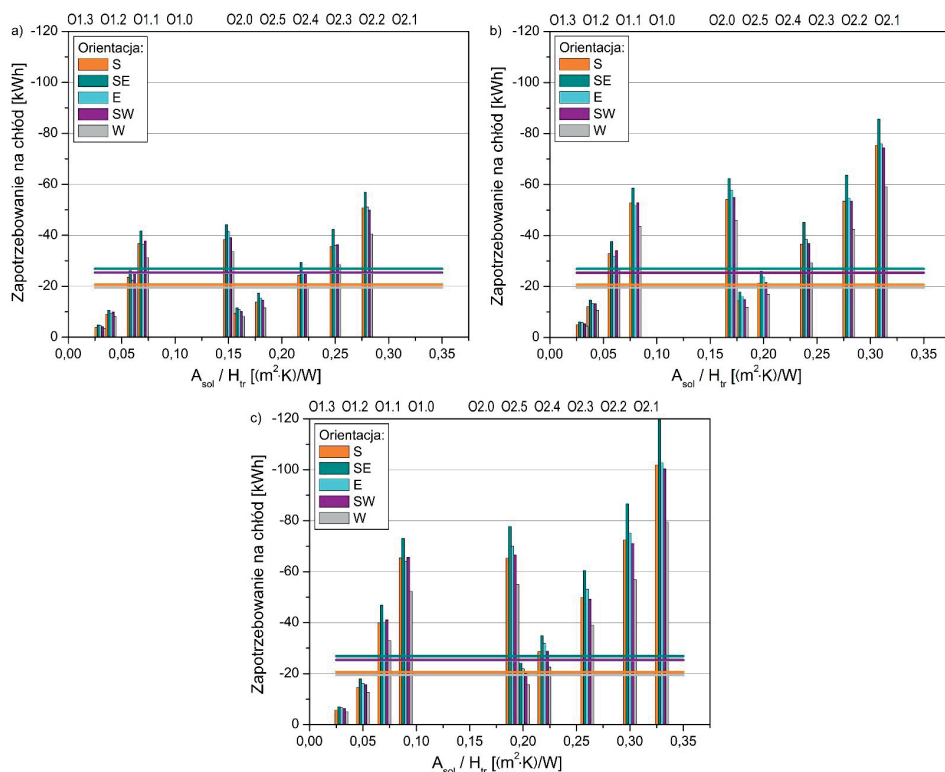
|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.  | O 1.1 | -13,4 | -16,2 | -17,7 | -13,4 | -16,1 | -17,4 | -17,4 | -19,4 | -20,2 | -17,2 | -19,4 | -20,4 | -18,5 | -20,0 | -20,6 |
| 3.  | O 1.2 | -1,4  | -3,2  | -4,1  | -1,9  | -3,6  | -4,4  | -8,5  | -9,8  | -10,3 | -7,8  | -9,2  | -9,8  | -11,5 | -12,4 | -12,7 |
| 4.  | O 1.3 | 6,5   | 5,5   | 5,1   | 5,8   | 4,8   | 4,5   | -2,7  | -3,3  | -3,5  | -1,7  | -2,5  | -2,7  | -7,1  | -7,5  | -7,5  |
| 5.  | O 2.0 | -56,2 | -58,0 | -58,2 | -55,1 | -56,9 | -57,1 | -54,0 | -55,4 | -55,7 | -55,1 | -56,6 | -56,9 | -52,4 | -53,6 | -53,8 |
| 6.  | O 2.1 | -67,8 | -68,6 | -70,4 | -66,7 | -67,6 | -69,4 | -65,0 | -65,6 | -67,1 | -66,5 | -67,4 | -68,9 | -63,0 | -63,5 | -65,0 |
| 7.  | O 2.2 | -64,2 | -65,0 | -66,9 | -63,3 | -64,1 | -65,9 | -62,0 | -62,6 | -64,3 | -63,3 | -64,0 | -65,8 | -60,4 | -60,8 | -62,2 |
| 8.  | O 2.3 | -60,3 | -61,1 | -63,1 | -59,6 | -60,3 | -62,3 | -59,0 | -59,4 | -61,1 | -60,0 | -60,6 | -62,3 | -57,8 | -58,0 | -59,4 |
| 9.  | O 2.4 | -55,1 | -55,5 | -57,5 | -54,6 | -55,0 | -56,9 | -55,1 | -55,3 | -56,8 | -55,8 | -56,1 | -57,7 | -54,6 | -54,5 | -55,8 |
| 10. | O 2.5 | -52,4 | -52,8 | -54,7 | -52,1 | -52,4 | -54,3 | -53,2 | -53,2 | -54,7 | -53,7 | -53,8 | -55,5 | -53,2 | -53,0 | -54,2 |

Oszklenia typu O 1.2, O 1.3, O 2.4 (dla mniejszych wysokości szyb) i O 2.5, czyli o najmniejszej przepuszczalności promieniowania słonecznego, pozwalają zmniejszyć zapotrzebowanie na chłód poniżej poziomu wyznaczonego dla mieszkania z otwartym balkonem. Pozostałe warianty obudowy balkonu powodują wzrost potrzeb chłodniczych w strefie 2, sięgający od 1% do ponad 390% (tabela 6.18).

Podczas sezonu chłodniczego, najmniej i najbardziej korzystna orientacja balkonu to odpowiednio zachód i południowy wschód (rys. 6.26). Wzrost zapotrzebowania na chłód wynikający z obrotu mieszkania względem orientacji zachodniej wynosi od około 31% do 42% (obudowy nieizolowane z oszkleniami jednoszybowymi), i od około 32% do 55% (obudowy izolowane z oszkleniami dwuszybowymi).

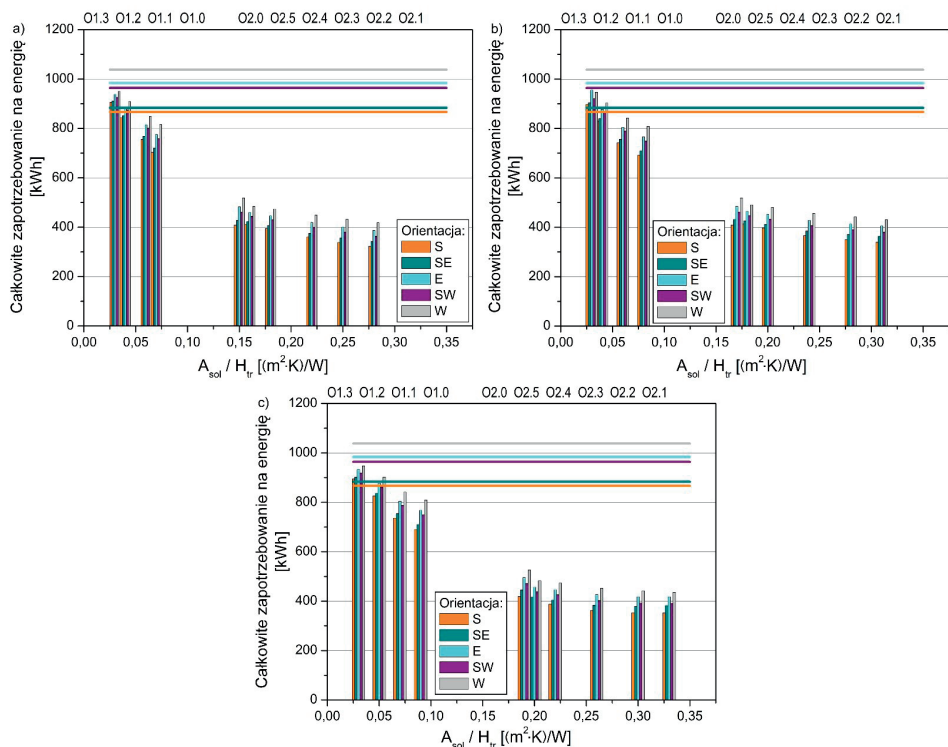
**Tabela 6.18.** Zmiana zapotrzebowania na chłód w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 3 ścianach balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | 78,1               | 155,6 | 217,0 | 55,4               | 118,1 | 172,1 | 44,6               | 105,0 | 154,1 | 49,0               | 108,5 | 158,6 | 60,7               | 123,9 | 169,0 |
| 2.  | O 1.1         | 14,3               | 59,2  | 93,8  | -2,8               | 40,2  | 74,4  | -11,1              | 26,2  | 58,2  | -2,0               | 34,3  | 61,9  | -1,3               | 39,4  | 69,3  |
| 3.  | O 1.2         | -56,9              | -41,7 | -29,7 | -60,6              | -45,3 | -33,2 | -63,3              | -47,6 | -36,3 | -60,7              | -48,0 | -38,1 | -58,6              | -45,0 | -34,9 |
| 4.  | O 1.3         | -80,7              | -75,8 | -71,8 | -82,1              | -77,7 | -74,0 | -81,8              | -77,1 | -73,9 | -83,4              | -78,7 | -75,0 | -82,4              | -77,4 | -73,8 |
| 5.  | O 2.0         | 85,6               | 162,4 | 216,5 | 64,6               | 132,2 | 189,5 | 64,1               | 128,7 | 177,6 | 54,2               | 116,1 | 161,9 | 72,9               | 136,0 | 182,9 |
| 6.  | O 2.1         | 146,0              | 265,0 | 393,8 | 112,1              | 219,1 | 345,3 | 102,5              | 201,1 | 307,3 | 96,6               | 193,3 | 295,5 | 108,5              | 204,1 | 308,5 |
| 7.  | O 2.2         | 72,4               | 159,3 | 251,1 | 57,7               | 137,2 | 222,5 | 43,0               | 116,2 | 197,5 | 43,4               | 110,5 | 180,1 | 46,8               | 117,6 | 191,9 |
| 8.  | O 2.3         | 17,6               | 77,5  | 141,5 | 9,1                | 68,3  | 125,0 | 1,0                | 52,6  | 110,5 | -1,9               | 45,4  | 93,9  | 1,7                | 50,7  | 101,0 |
| 9.  | O 2.4         | -33,1              | 2,9   | 38,7  | -35,5              | -3,1  | 29,7  | -39,2              | -5,9  | 26,2  | -42,6              | -15,2 | 13,4  | -40,8              | -13,0 | 16,1  |
| 10. | O 2.5         | -54,0              | -30,2 | -4,1  | -57,0              | -33,8 | -10,2 | -57,0              | -36,1 | -13,1 | -59,9              | -41,1 | -20,9 | -58,0              | -39,3 | -19,2 |



**Rys. 6.26.** Zapotrzebowanie na chłód w strefie 2 w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

Całkowite zapotrzebowanie na energię maleje wraz ze wzrostem stosunku  $A_{sol} / H_{tr}$ . W 90% spośród analizowanych wariantów potrzeby energetyczne w strefie drugiej uległy zmniejszeniu dzięki zabudowie balkonu w porównaniu z wersją bazową (rys. 6.27). Efekty te są bardziej widoczne, jeżeli zastosowano obudowy z oszklaceniami podwójnymi – zmiany wynoszą od około 50% do prawie 63%. Obudowy z oszklaceniami pojedynczymi dają mniejszą redukcję zapotrzebowania na energię (od około 3% do ponad 22%). W tej grupie w sześciu przypadkach zapotrzebowanie na ciepło zwiększyło się. Miało to miejsce jeżeli przyjęto oszklenie o przepuszczalności promieniowania poniżej 0,5, a frontowa ściana balkonu skierowana była na południe lub południowy wschód (tabela 6.19).



**Rys. 6.27.** Calkowite zapotrzebowanie na energie w strefie 2 w zaleznosci od orientacji balkonu. Mieszkanie w czesci skrajnej budynku, oszklenie na 3 scianach obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energie w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

**Tabela 6.19.** Zmiana calkowitego zapotrzebowania na energie w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2, mieszkanie w czesci skrajnej budynku, oszklenie na 3 scianach balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a zolty – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -18,8              | -20,2 | -20,5 | -18,5              | -19,6 | -19,6 | -21,3              | -22,1 | -22,0 | -21,3              | -22,3 | -22,3 | -21,4              | -22,1 | -22,0 |
| 2.  | O 1.1         | -12,8              | -14,4 | -15,0 | -13,1              | -14,4 | -14,6 | -17,2              | -18,2 | -18,2 | -16,8              | -18,0 | -18,2 | -18,2              | -18,9 | -18,9 |
| 3.  | O 1.2         | -2,7               | -4,2  | -4,7  | -3,7               | -4,9  | -5,3  | -9,9               | -10,7 | -10,9 | -9,2               | -10,2 | -10,5 | -12,4              | -13,0 | -13,1 |
| 4.  | O 1.3         | 4,5                | 3,6   | 3,3   | 3,1                | 2,3   | 2,1   | -4,7               | -2,9  | -5,3  | -3,9               | -4,5  | -4,6  | -8,5               | -8,8  | -8,7  |
| 5.  | O 2.0         | -52,8              | -52,7 | -51,7 | -51,5              | -51,1 | -49,7 | -51,0              | -50,7 | -49,7 | -52,2              | -52,0 | -51,1 | -50,0              | -50,0 | -49,3 |
| 6.  | O 2.1         | -62,7              | -60,7 | -59,3 | -61,3              | -58,9 | -56,8 | -60,7              | -58,8 | -57,5 | -62,2              | -60,5 | -59,4 | -59,7              | -58,5 | -58,0 |
| 7.  | O 2.2         | -61,0              | -59,6 | -59,3 | -59,6              | -58,0 | -57,1 | -59,3              | -58,0 | -57,6 | -60,5              | -59,4 | -59,3 | -58,3              | -57,4 | -57,5 |

| Lp. | Typ<br>oszkle-<br>nia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|-----------------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |                       | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |                       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |                       | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 8.  | O 2.3                 | -58,4              | -57,8 | -58,2 | -57,5              | -56,4 | -56,6 | -57,5              | -56,6 | -56,7 | -58,5              | -57,8 | -58,2 | -56,7              | -56,0 | -56,4 |
| 9.  | O 2.4                 | -54,5              | -54,1 | -55,2 | -54,0              | -53,4 | -54,3 | -54,7              | -54,0 | -54,7 | -55,4              | -55,0 | -55,8 | -54,3              | -53,8 | -54,4 |
| 10. | O 2.5                 | -52,5              | -52,2 | -53,5 | -52,2              | -51,8 | -52,9 | -53,3              | -52,8 | -53,7 | -53,9              | -53,5 | -54,6 | -53,3              | -52,7 | -53,5 |

### Strefa 2 i 3

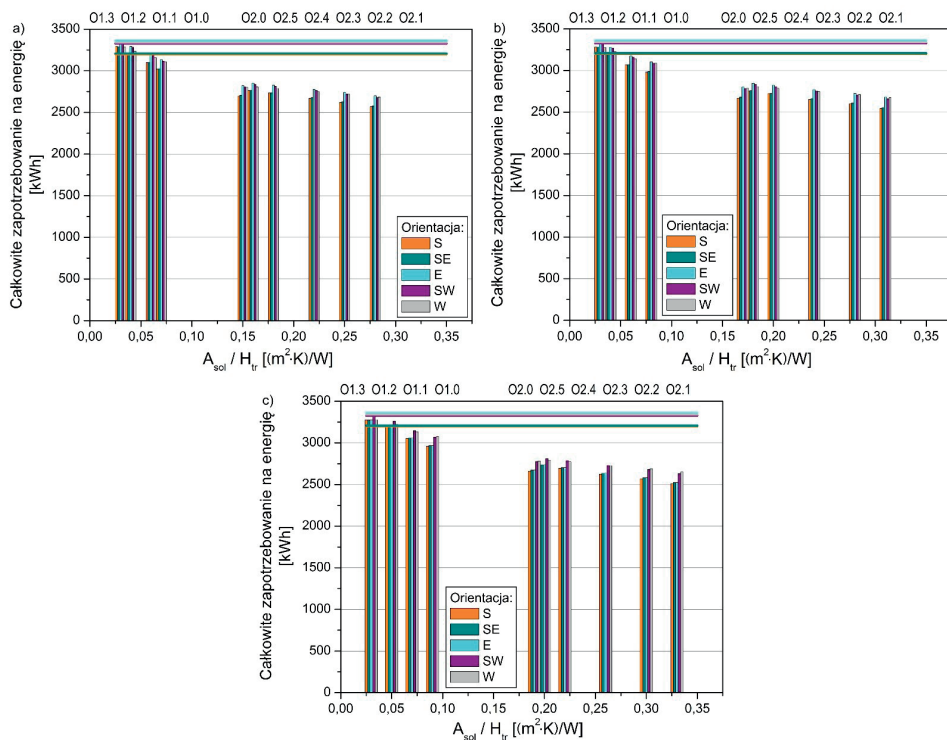
Jeżeli zastosowano obudowy nieizolowane z wykorzystaniem oszkleń jedno-  
szybowych o przepuszczalności promieniowania słonecznego mniejszej niż 0,5  
(O 1.2 i O 1.3), zapotrzebowanie na ciepło w mieszkaniu nieznacznie wzrasta  
(maksymalnie o około 3%). W pozostałych przypadkach zapotrzebowania na  
ciepło w porównaniu z wersją bazową mieszkania maleje, a spadek wynosi średnio  
od 4% do 21% (tabela 6.20).

Zapotrzebowanie na ciepło w całym mieszkaniu jest najmniejsze, jeżeli balkon  
skierowany jest na południe lub południowy wschód (rys. 6.28), tak jak w poprzed-  
nich wariantach. Najgorszą orientacją jest południowy zachód lub zachód. Zapo-  
trzebowanie na ciepło jest mniej zależne od obrotu mieszkania w porównaniu  
z lokalem w środkowej części budynku - zmiany wynikające z modyfikacji położe-  
nia balkonu względem kierunku najbardziej korzystnego wynoszą od około 2% do  
4% (obudowy nieizolowane z oszkleniami jednoszybowymi), i od około 2,5% do  
5% (obudowy izolowane z oszkleniami dwuszybowymi).

**Tabela 6.20.** Zmiana zapotrzebowania na ciepło w stosunku do mieszkania z balkonem  
otwartym [%]. Strefa 2 i 3, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 3 ścianach  
balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – naj-  
bardziej korzystny).

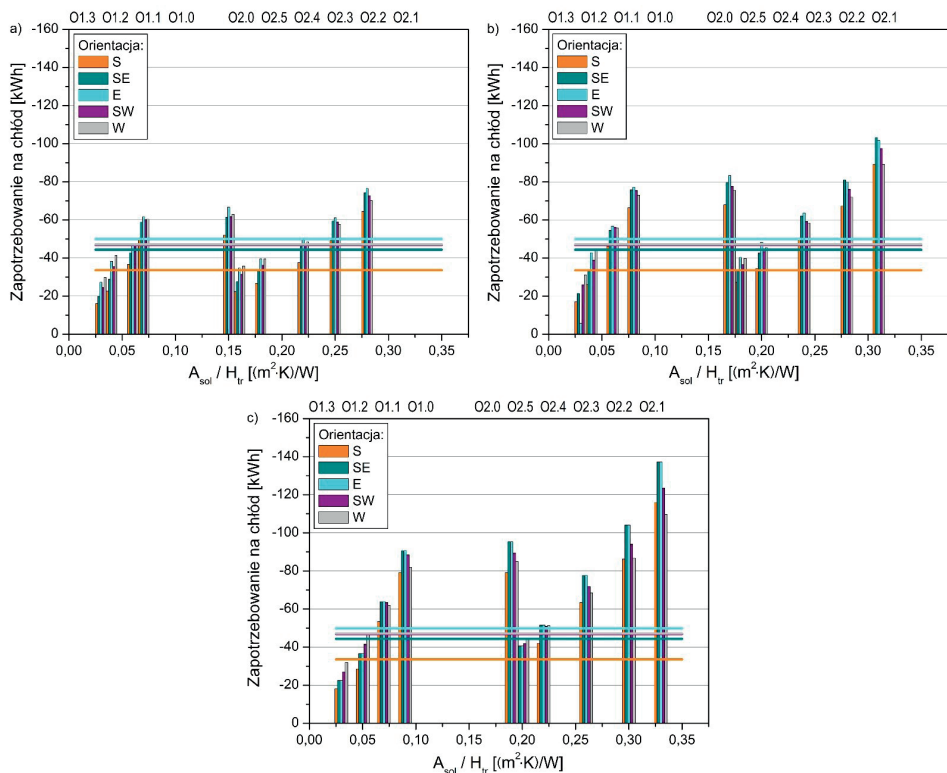
| Lp. | Typ<br>oszkle-<br>nia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|-----------------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |                       | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |                       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |                       | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0                 | -5,6               | -6,8  | -7,4  | -5,7               | -6,8  | -7,5  | -6,8               | -7,6  | -8,0  | -6,3               | -7,2  | -7,7  | -7,0               | -7,6  | -7,9  |
| 2.  | O 1.1                 | -3,1               | -4,0  | -4,5  | -3,3               | -4,2  | -4,7  | -4,9               | -5,6  | -5,9  | -4,3               | -5,1  | -5,4  | -5,5               | -6,0  | -6,2  |
| 3.  | O 1.2                 | 0,6                | 0,1   | -0,2  | 0,3                | -0,2  | -0,5  | -2,0               | -2,4  | -2,6  | -1,3               | -1,8  | -2,0  | -3,2               | -3,5  | -3,6  |
| 4.  | O 1.3                 | 2,9                | 2,6   | 2,5   | 2,6                | 2,3   | 2,1   | -0,2               | -0,4  | -0,5  | 0,5                | 0,3   | 0,2   | -1,7               | -1,9  | -1,9  |
| 5.  | O 2.0                 | -15,7              | -16,5 | -16,8 | -15,7              | -16,4 | -16,6 | -16,0              | -16,7 | -16,8 | -15,7              | -16,3 | -16,5 | -16,1              | -16,6 | -16,7 |
| 6.  | O 2.1                 | -19,7              | -20,4 | -21,5 | -19,6              | -20,3 | -21,3 | -19,7              | -20,3 | -21,1 | -19,5              | -20,1 | -20,9 | -19,6              | -20,0 | -20,7 |
| 7.  | O 2.2                 | -18,1              | -18,7 | -19,6 | -18,0              | -18,6 | -19,5 | -18,4              | -18,9 | -19,6 | -18,2              | -18,6 | -19,4 | -18,6              | -18,9 | -19,5 |
| 8.  | O 2.3                 | -16,5              | -17,0 | -17,9 | -16,5              | -17,0 | -17,8 | -17,3              | -17,6 | -18,3 | -16,9              | -17,3 | -18,0 | -17,7              | -17,9 | -18,4 |
| 9.  | O 2.4                 | -14,5              | -14,9 | -15,7 | -14,7              | -15,0 | -15,8 | -15,8              | -16,0 | -16,6 | -15,4              | -15,7 | -16,3 | -16,5              | -16,6 | -17,1 |
| 10. | O 2.5                 | -13,5              | -13,8 | -14,6 | -13,7              | -14,0 | -14,7 | -15,1              | -15,3 | -15,8 | -14,7              | -14,9 | -15,4 | -16,0              | -16,0 | -16,5 |





**Rys. 6.28.** Zapotrzebowanie na ciepło w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 3 ścianach balkonu, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

Zapotrzebowanie na chłód również może ulec zwiększeniu lub zmniejszeniu w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym, w zależności od zastosowanego wariantu obudowy i oszkleń (tabela 6.21). Zestawy jedno- i dwuszybowe o przepuszczalności promieniowania słonecznego mniejszej niż 0,5 (O 1.2, O 1.3, O 2.4, O 2.5) powodują zmniejszenie zysków słonecznych i spadek zapotrzebowania na chłód (od 2% do 52%). Pozostałe oszklenia przyczyniają się do wzrostu potrzeb chłodniczych, wynoszącego od 10% (O 1.1 wysokość 1,80 m) do blisko 250% (O 2.1, wysokość 2,60 m).



**Rys. 6.29.** Zapotrzebowanie na chłód w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

**Tabela 6.21.** Zmiana zapotrzebowania na chłód w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2 i 3, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 3 ścianach balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | 49,7               | 98,0  | 136,0 | 32,5               | 71,2  | 104,3 | 23,4               | 54,7  | 79,9  | 28,6               | 61,5  | 89,0  | 27,8               | 54,8  | 73,8  |
| 2.  | O 1.1         | 9,6                | 37,7  | 59,3  | -3,6               | 23,0  | 44,1  | -5,9               | 13,7  | 30,3  | 0,0                | 20,2  | 35,5  | 0,9                | 18,5  | 31,3  |
| 3.  | O 1.2         | -32,5              | -22,6 | -14,9 | -34,8              | -24,9 | -17,3 | -23,3              | -14,3 | -8,1  | -24,3              | -16,8 | -11,2 | -12,1              | -5,6  | -0,9  |
| 4.  | O 1.3         | -52,5              | -48,9 | -46,2 | -55,0              | -51,9 | -49,4 | -45,5              | -88,4 | -40,6 | -47,5              | -44,6 | -42,3 | -36,8              | -34,2 | -32,4 |
| 5.  | O 2.0         | 54,6               | 102,4 | 135,9 | 38,4               | 79,9  | 114,9 | 33,6               | 67,0  | 92,0  | 31,8               | 66,0  | 91,1  | 33,5               | 60,4  | 80,2  |
| 6.  | O 2.1         | 92,1               | 165,8 | 245,2 | 67,5               | 132,9 | 209,6 | 53,3               | 103,9 | 157,9 | 55,2               | 108,3 | 163,9 | 48,8               | 89,2  | 132,7 |
| 7.  | O 2.2         | 46,2               | 100,3 | 157,1 | 33,9               | 82,7  | 134,9 | 22,5               | 60,3  | 102,0 | 25,6               | 62,8  | 100,9 | 22,3               | 52,5  | 83,9  |

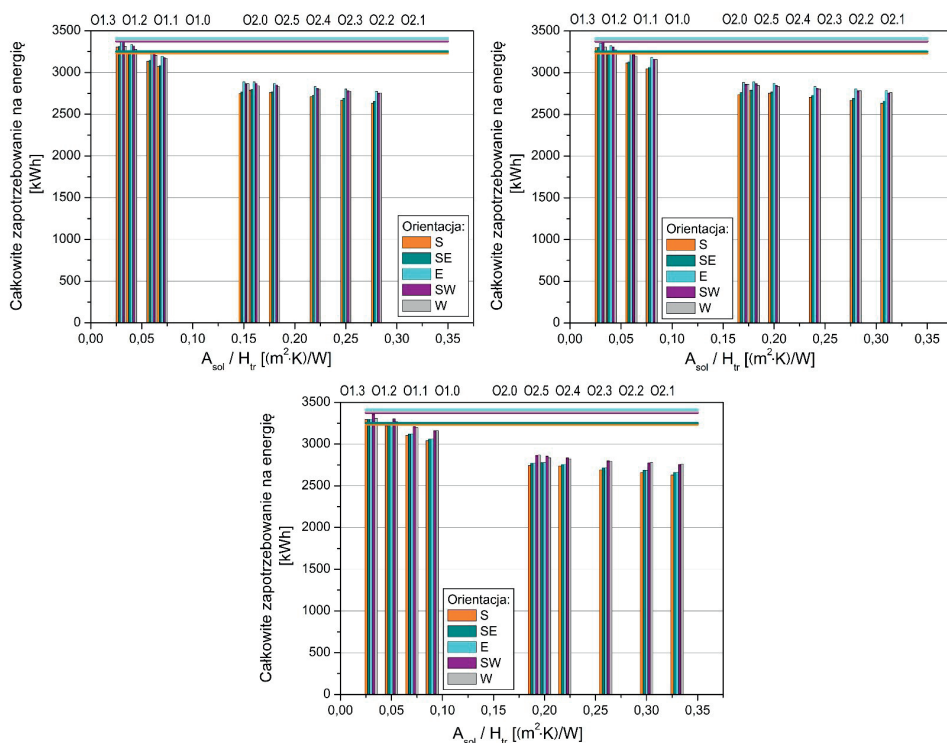
| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |      |                    |       |      |                    |       |      |                    |       |       |                    |       |      |
|-----|---------------|--------------------|-------|------|--------------------|-------|------|--------------------|-------|------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|------|
|     |               | S                  |       |      | SE                 |       |      | E                  |       |      | SW                 |       |       | W                  |       |      |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |      | Wys. oszklenia [m] |       |      | Wys. oszklenia [m] |       |      | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |      |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60 | 1,80               | 2,20  | 2,60 | 1,80               | 2,20  | 2,60 | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60 |
| 8.  | O 2.3         | 12,0               | 49,3  | 89,0 | 3,8                | 40,3  | 75,2 | 0,5                | 27,4  | 57,2 | 0,4                | 26,6  | 53,4  | 2,7                | 23,9  | 45,3 |
| 9.  | O 2.4         | -20,2              | 2,6   | 25,0 | -24,2              | -3,9  | 16,4 | -20,9              | -3,2  | 13,6 | -22,6              | -7,1  | 8,8   | -16,1              | -3,8  | 8,8  |
| 10. | O 2.5         | -33,6              | -18,4 | -1,9 | -37,8              | -23,2 | -8,4 | -30,5              | -19,2 | -7,0 | -32,7              | -21,8 | -10,4 | -24,1              | -15,5 | -6,6 |

Wraz ze zwiększeniem odchylenia od kierunku południowego rośnie zapotrzebowanie na chłód, osiągając wielkości maksymalne dla kierunku wschodniego, południowo-wschodniego lub zachodniego (rys. 6.29). Wyniki zmieniają się od 13% do 87% (obudowy nieizolowane z oszkleniami jednoszybowymi), i od 14% do 56% (obudowy izolowane z oszkleniami dwuszybowymi) w stosunku do orientacji najbardziej korzystnej.

W skali całego mieszkania spadek sumarycznego zapotrzebowania na energię w porównaniu z mieszkaniem z balkonem otwartym nie przekracza 7% (obudowy z oszkleniami jednoszybowymi), a dla grupy oszkleń dwuszybowych wynosi od około 15% do 19%. W grupie pierwszej zapotrzebowanie na energię może w niewielkim stopniu wzrosnąć – ma to miejsce dla oszklenia O 1.3 w obudowie skierowanej na południe lub południowy wschód (rys. 6.30, tabela 6.22).

**Tabela 6.22.** Zmiana całkowitego zapotrzebowania na energię w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2 i 3, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 3 ścianach balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -5,0               | -5,7  | -6,0  | -5,2               | -5,8  | -5,9  | -6,3               | -6,7  | -6,8  | -5,8               | -6,3  | -6,4  | -6,5               | -6,8  | -6,8  |
| 2.  | O 1.1         | -2,9               | -3,6  | -3,9  | -3,3               | -3,8  | -4,0  | -4,9               | -5,3  | -5,4  | -4,2               | -4,7  | -4,9  | -5,4               | -5,7  | -5,7  |
| 3.  | O 1.2         | 0,3                | -0,2  | -0,4  | -0,2               | -0,6  | -0,7  | -2,3               | -2,6  | -2,7  | -1,7               | -2,0  | -2,1  | -3,3               | -3,5  | -3,6  |
| 4.  | O 1.3         | 2,3                | 2,1   | 1,9   | 1,8                | 1,5   | 1,4   | -0,9               | -1,7  | -1,1  | -0,2               | -0,4  | -0,4  | -2,2               | -2,3  | -2,3  |
| 5.  | O 2.0         | -15,0              | -15,3 | -15,2 | -14,9              | -15,1 | -14,9 | -15,3              | -15,4 | -15,3 | -15,0              | -15,2 | -15,0 | -15,4              | -15,5 | -15,4 |
| 6.  | O 2.1         | -18,5              | -18,5 | -18,7 | -18,4              | -18,2 | -18,2 | -18,6              | -18,4 | -18,5 | -18,4              | -18,3 | -18,3 | -18,7              | -18,5 | -18,6 |
| 7.  | O 2.2         | -17,4              | -17,5 | -17,8 | -17,3              | -17,2 | -17,4 | -17,8              | -17,7 | -17,9 | -17,5              | -17,5 | -17,7 | -18,1              | -17,9 | -18,1 |
| 8.  | O 2.3         | -16,2              | -16,3 | -16,8 | -16,3              | -16,2 | -16,6 | -17,0              | -16,9 | -17,2 | -16,7              | -16,7 | -17,0 | -17,4              | -17,3 | -17,5 |
| 9.  | O 2.4         | -14,6              | -14,7 | -15,3 | -14,8              | -14,9 | -15,3 | -15,9              | -15,8 | -16,1 | -15,5              | -15,5 | -15,9 | -16,5              | -16,4 | -16,7 |
| 10. | O 2.5         | -13,8              | -13,9 | -14,5 | -14,1              | -14,1 | -14,6 | -15,4              | -15,3 | -15,7 | -14,9              | -15,0 | -15,4 | -16,1              | -16,0 | -16,3 |



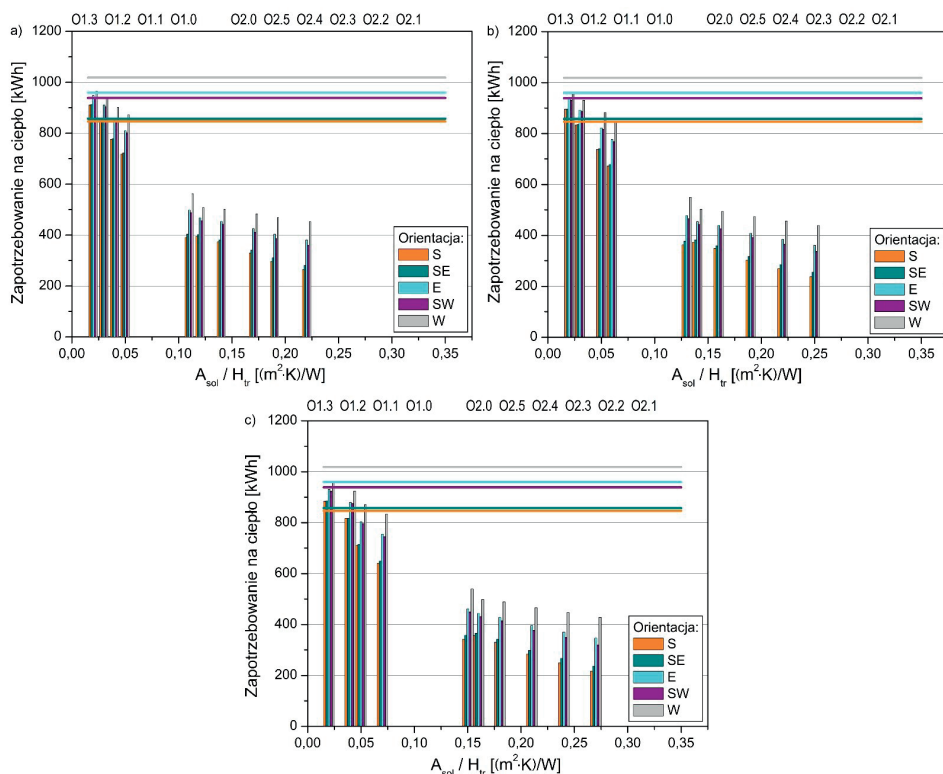
**Rys. 6.30.** Całkowite zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

#### 6.2.4. Mieszkanie w skrajnej części budynku, oszklenie na jednej ścianie obudowy balkonu

##### Strefa 2

Porównując wyniki z wersją bazową można stwierdzić, że wprowadzenie systemu szklarniowego z oszkleniami podwójnymi zmniejszyło zapotrzebowanie na ciepło do ponad 74,4%. Oszklenia pojedyncze są mniej skuteczne, przynosząc oszczędności energii sięgające do 24,4%, a w niektórych przypadkach zwiększając potrzeby grzewcze. Wyniki te są porównywalne z wynikami uzyskanymi dla balkonów oszklonych na trzech ścianach. Największe efekty przyniosła obudowa z oszkleniem O 2.1, a najmniejsze – z oszkleniem O 1.3 (w niektórych wariantach zwiększając zapotrzebowanie na ciepło), tak jak w większości dotychczas opisywanych przypadków (tabela 6.23).

Zapotrzebowanie na ciepło osiąga najmniejsze wartości kiedy ściana frontowa balkonu skierowana jest na południe lub południowy wschód (rys. 6.31), a najmniej korzystnym kierunkiem jest zachód. Obrót względem kierunku południowego może powodować wzrost zapotrzebowania na energię od 6% do 30% (obudowy nieizolowane z oszkleniami jednoszybowymi), i od 28% do 97% (obudowy izolowane z oszkleniami dwuszybowymi) – w tym przypadku wyniki symulacji są bardziej podatne na zmianę orientacji.



**Rys. 6.31.** Zapotrzebowanie na ciepło w strefie 2 w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

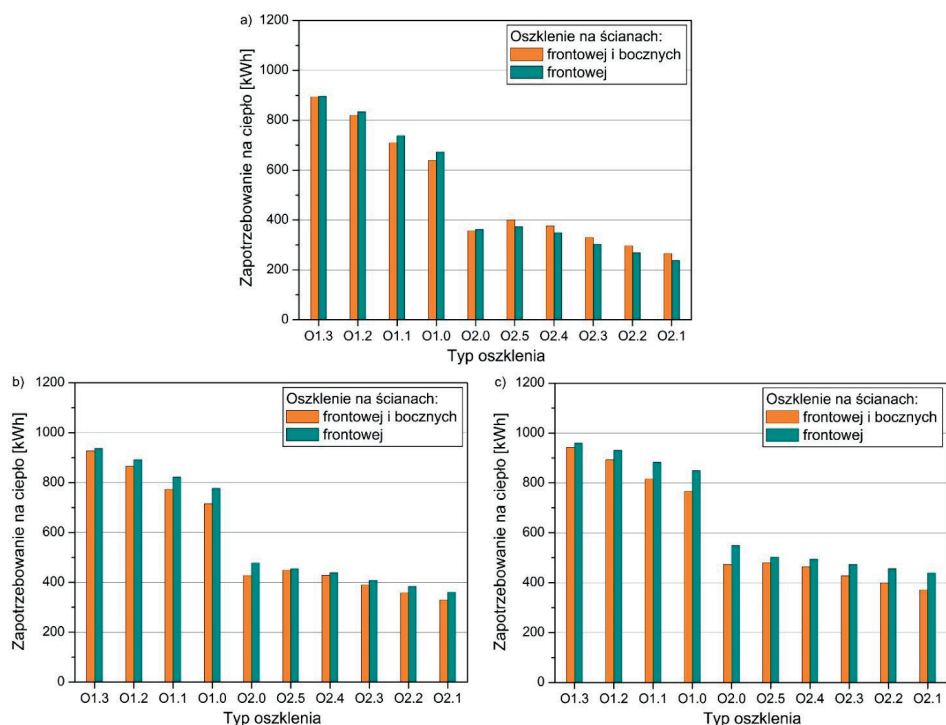
**Tabela 6.23.** Zmiana zapotrzebowania na ciepło w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -15,1              | -20,5 | -24,3 | -15,7              | -20,8 | -24,4 | -15,6              | -19,0 | -21,3 | -14,5              | -18,2 | -20,6 | -14,3              | -16,7 | -18,2 |
| 2.  | O 1.1         | -8,3               | -12,9 | -16,1 | -9,2               | -13,6 | -16,7 | -11,3              | -14,3 | -16,3 | -10,1              | -13,1 | -15,1 | -11,5              | -13,4 | -14,6 |
| 3.  | O 1.2         | 1,5                | -1,5  | -3,5  | 0,4                | -2,6  | -4,6  | -5,1               | -7,0  | -8,3  | -3,7               | -5,6  | -6,8  | -7,6               | -8,7  | -9,4  |
| 4.  | O 1.3         | 7,6                | 5,8   | 4,5   | 6,5                | 4,6   | 3,3   | -1,1               | -2,3  | -3,0  | 0,2                | -0,9  | -1,6  | -5,2               | -5,8  | -6,1  |
| 5.  | O 2.0         | -53,8              | -57,2 | -59,7 | -52,9              | -56,0 | -58,3 | -48,1              | -50,2 | -51,9 | -48,1              | -50,3 | -52,2 | -44,8              | -46,0 | -55,9 |
| 6.  | O 2.1         | -68,8              | -72,0 | -74,4 | -67,2              | -70,2 | -72,4 | -60,3              | -62,4 | -63,9 | -61,6              | -64,0 | -65,9 | -55,6              | -57,0 | -68,6 |
| 7.  | O 2.2         | -65,0              | -68,2 | -70,5 | -63,8              | -66,7 | -68,9 | -58,0              | -59,9 | -61,4 | -58,8              | -61,1 | -62,8 | -54,0              | -55,2 | -65,8 |
| 8.  | O 2.3         | -61,1              | -64,2 | -66,5 | -60,2              | -63,1 | -65,2 | -55,7              | -57,4 | -58,8 | -56,1              | -58,2 | -59,8 | -52,6              | -53,5 | -63,0 |
| 9.  | O 2.4         | -56,0              | -58,8 | -61,0 | -55,5              | -58,1 | -60,1 | -52,7              | -54,2 | -55,4 | -52,9              | -54,5 | -55,9 | -50,8              | -51,5 | -59,4 |
| 10. | O 2.5         | -53,3              | -55,9 | -58,0 | -53,0              | -55,5 | -57,4 | -51,2              | -52,7 | -53,8 | -51,4              | -52,8 | -54,0 | -50,1              | -50,7 | -57,6 |

W grupie obudów z oszkleniami jednoszybowymi, usunięcie okien ze ścian bocznych balkonu powoduje niewielki wzrost zapotrzebowania na ciepło w pokoju sąsiadującym z balkonem (nie przekraczający 8%). Z kolei wśród oszkleń dwuszybowych z powłokami spektralnie selektywnymi zabieg ten zmniejsza zapotrzebowania na ciepło (maksymalnie do około 13%), co świadczy o większym znaczeniu izolacyjności obudowy w porównaniu z zyskami słonecznymi zapewnianymi przez okna boczne. Prawidłowość tę zaobserwowano dla kierunku południowego i południowo-wschodniego. Dla pozostałych orientacji balkonu, mniejsze zyski słoneczne spowodowane redukcją powierzchni oszklenia wiążą się z większym zapotrzebowaniem na ciepło (rys. 6.32 b, c).

Dzięki lekkim obudowom jednoszybowym możliwe jest zmniejszenie zapotrzebowania na chłód w porównaniu z pomieszczeniem sąsiadującym z balkonem otwartym. Obudowy izolowane w 47% przypadków powodują wzrost zapotrzebowania na energię ponad poziom bazowy (tabela 6.24).

Skierowanie balkonu na zachód pozwala ograniczyć zapotrzebowanie na chłód do minimum w większości wariantów materiałowych obudowy (rys. 6.33). Dla oszkleń podwójnych o największej wysokości korzystniejsza może być orientacja południowa. Wzrost zapotrzebowania na chłód spowodowany zmianą orientacji sięga od około 22% do 63% (obudowy nieizolowane z oszkleniami jednoszybowymi), i od około 38% do 87% (obudowy izolowane z oszkleniami dwuszybowymi).

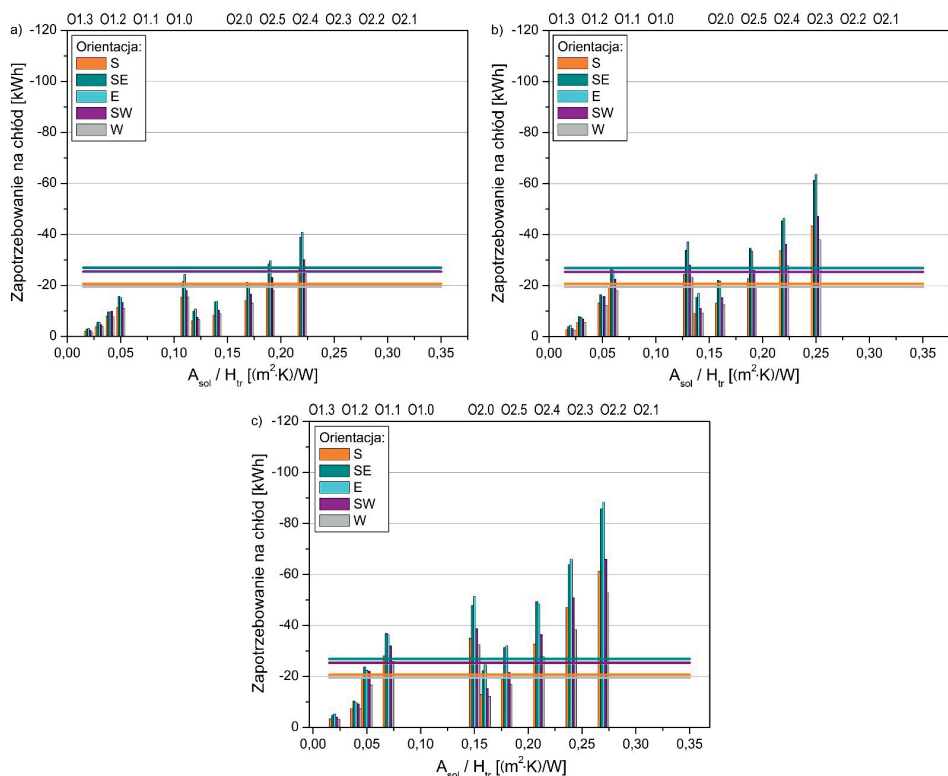


**Rys. 6.32.** Zapotrzebowanie na ciepło w strefie 2 w zależności od liczby oszklonych ścian obudowy. Mieszkanie w części skrajnej budynku, wysokość oszkleń 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

**Tabela 6.24.** Zmiana zapotrzebowania na chłód w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszkleń na 1 ścianie balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

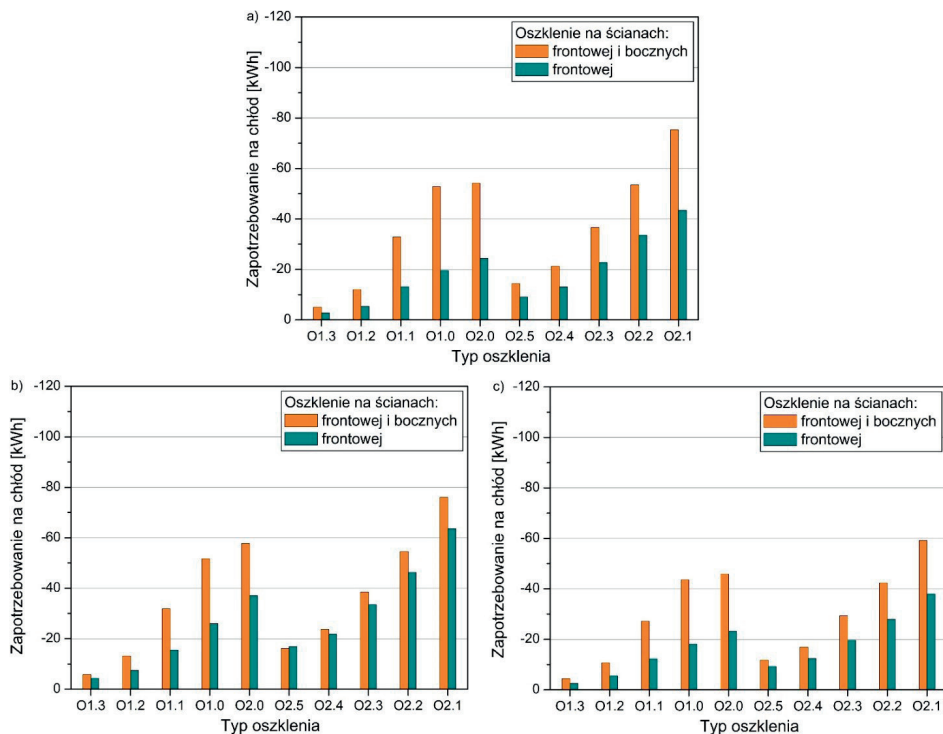
| Lp. | Typ<br>oszkle-<br>nia | Orientacja balkonu |       |       |                  |       |       |                  |       |       |                  |       |       |                  |       |       |
|-----|-----------------------|--------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
|     |                       | S                  |       |       | SE               |       |       | E                |       |       | SW               |       |       | W                |       |       |
|     |                       | Wys. oszkleń [m]   |       |       | Wys. oszkleń [m] |       |       | Wys. oszkleń [m] |       |       | Wys. oszkleń [m] |       |       | Wys. oszkleń [m] |       |       |
|     |                       | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80             | 2,20  | 2,60  | 1,80             | 2,20  | 2,60  | 1,80             | 2,20  | 2,60  | 1,80             | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0                 | -45,7              | -5,2  | 36,2  | -42,0            | -1,1  | 37,5  | -39,6            | 3,3   | 44,1  | -47,3            | -11,7 | 26,3  | -43,2            | -6,8  | 33,6  |
| 2.  | O 1.1                 | -61,5              | -36,0 | -5,8  | -64,4            | -39,1 | -11,5 | -61,7            | -38,3 | -11,1 | -61,3            | -37,9 | -12,9 | -59,6            | -36,8 | -14,4 |
| 3.  | O 1.2                 | -81,7              | -73,6 | -64,0 | -79,3            | -70,7 | -61,4 | -78,8            | -70,3 | -61,6 | -81,9            | -73,0 | -63,4 | -81,0            | -71,6 | -62,0 |
| 4.  | O 1.3                 | -90,7              | -86,6 | -83,3 | -89,4            | -85,2 | -81,8 | -87,7            | -82,9 | -78,9 | -90,8            | -87,4 | -84,0 | -91,0            | -86,9 | -83,3 |
| 5.  | O 2.0                 | -25,8              | 18,1  | 69,9  | -20,4            | 26,1  | 78,0  | -3,8             | 46,9  | 103,6 | -29,5            | 10,4  | 53,0  | -20,3            | 19,8  | 99,6  |
| 6.  | O 2.1                 | 29,2               | 110,5 | 197,4 | 45,0             | 128,5 | 219,0 | 61,6             | 151,9 | 250,4 | 18,8             | 86,0  | 160,1 | 25,6             | 95,0  | 239,4 |
| 7.  | O 2.2                 | 0,4                | 62,8  | 128,0 | 5,5              | 69,0  | 137,5 | 17,7             | 83,7  | 162,0 | -9,1             | 42,6  | 100,4 | -7,5             | 43,4  | 161,4 |
| 8.  | O 2.3                 | -31,8              | 10,0  | 58,5  | -21,4            | 29,1  | 83,8  | -18,3            | 32,7  | 91,8  | -34,6            | 2,4   | 43,8  | -33,0            | 0,8   | 87,6  |
| 9.  | O 2.4                 | -59,9              | -36,5 | -8,9  | -49,3            | -18,2 | 16,8  | -45,8            | -13,5 | 26,6  | -59,7            | -39,8 | -14,9 | -54,8            | -35,8 | 11,1  |
| 10. | O 2.5                 | -70,7              | -56,1 | -37,4 | -63,1            | -42,8 | -16,9 | -57,4            | -32,9 | -2,4  | -70,4            | -56,1 | -39,8 | -66,5            | -52,3 | -21,4 |





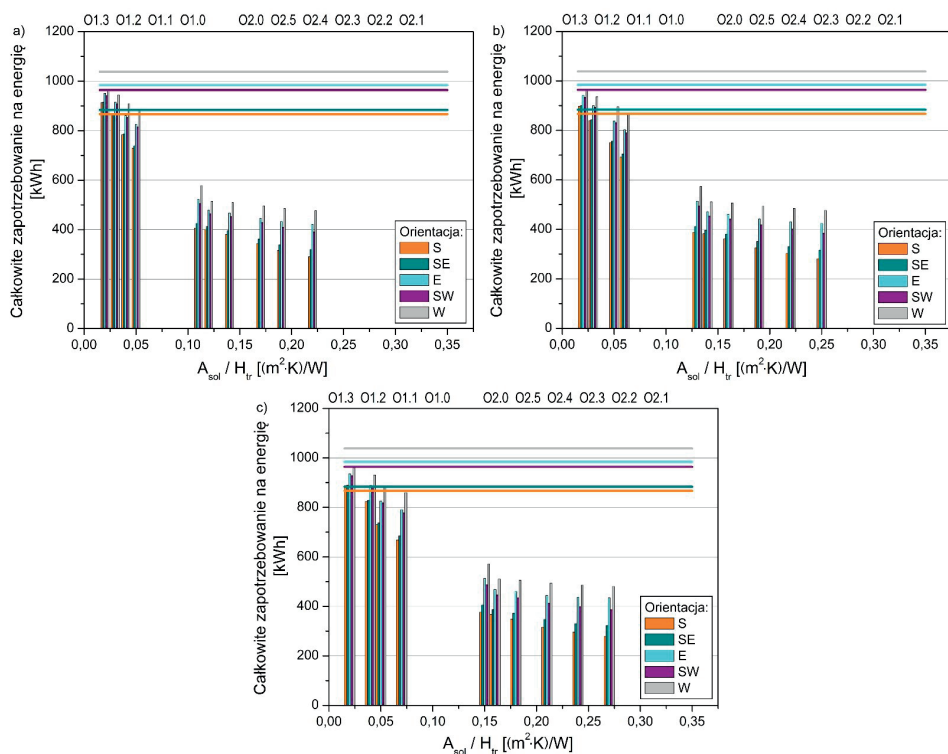
**Rys. 6.33.** Zapotrzebowanie na chłód w strefie 2 w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

Usunięcie oszklenia ze ścian bocznych zmniejsza zapotrzebowanie na chłód (jedynie poza oszkleniem typu O 2.5 skierowanym na wschód). Efekt ten jest najbardziej widoczny wśród obudów lekkich jednoszybowych (rys. 6.34).



**Rys. 6.34.** Zapotrzebowanie na chłód w strefie 2 w zależności od liczby oszklonych ścian obudowy. Mieszkanie w części skrajnej budynku, wysokość oszklwienia 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

Pomimo przeciwnych tendencji do zmian zapotrzebowania na ciepło i chłód wraz ze wzrostem proporcji  $A_{sol}/H_{tr}$ , całkowite zapotrzebowanie na energię stale maleje (rys. 6.35). Kierunek południowy jest najlepszy z punktu widzenia pasywnej konwersji promieniowania słonecznego, a zachodni – najgorszy. Poza balkonami z oszklzeniami O 1.3 skierowanymi na południe lub południowy wschód, wszystkie typy obudowy przyczyniają się do zmniejszenia zapotrzebowania na energię w strefie 2 (tabela 6.25).



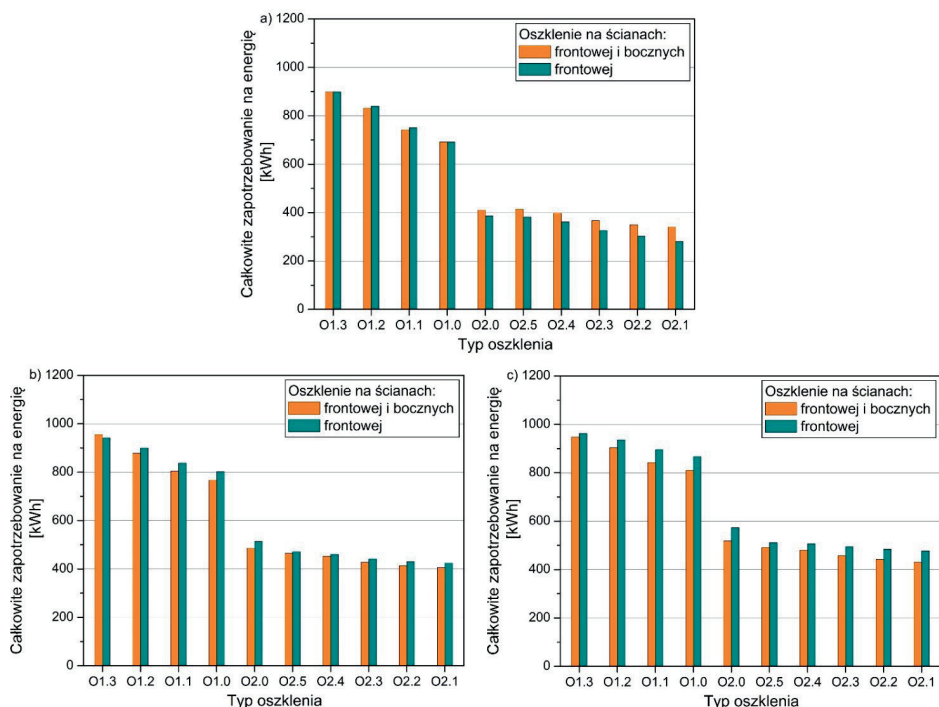
**Rys. 6.35.** Całkowite zapotrzebowanie na energię w strefie 2 w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

**Tabela 6.25.** Zmiana całkowitego zapotrzebowania na energię w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -15,8              | -20,2 | -22,9 | -16,5              | -20,2 | -22,5 | -16,2              | -18,5 | -19,7 | -15,4              | -18,0 | -19,4 | -14,9              | -16,5 | -17,2 |
| 2.  | O 1.1         | -9,6               | -13,4 | -15,8 | -10,9              | -14,4 | -16,5 | -12,6              | -14,9 | -16,1 | -11,4              | -13,7 | -15,1 | -12,4              | -13,8 | -14,6 |
| 3.  | O 1.2         | -0,5               | -3,2  | -5,0  | -2,0               | -4,6  | -6,4  | -7,0               | -8,6  | -9,6  | -5,8               | -7,3  | -8,3  | -9,0               | -9,8  | -10,3 |
| 4.  | O 1.3         | 5,3                | 3,6   | 2,4   | 3,6                | 1,9   | 0,7   | -3,4               | -4,4  | -5,0  | -2,2               | -3,2  | -3,7  | -6,8               | -7,3  | -7,5  |
| 5.  | O 2.0         | -53,2              | -55,4 | -56,6 | -51,9              | -53,5 | -54,2 | -47,0              | -47,7 | -47,9 | -47,6              | -48,7 | -49,4 | -44,3              | -44,8 | -53,0 |
| 6.  | O 2.1         | -66,5              | -67,6 | -67,9 | -63,8              | -64,2 | -63,6 | -57,2              | -56,9 | -55,9 | -59,5              | -60,1 | -60,0 | -54,1              | -54,1 | -62,8 |
| 7.  | O 2.2         | -63,5              | -65,1 | -65,8 | -61,7              | -62,6 | -62,6 | -56,0              | -56,3 | -55,7 | -57,5              | -58,4 | -58,6 | -53,2              | -53,3 | -61,5 |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8.  | O 2.3 | -60,4 | -62,4 | -63,6 | -59,0 | -60,3 | -60,7 | -54,7 | -55,1 | -55,0 | -55,6 | -56,6 | -57,1 | -52,2 | -52,5 | -60,2 |
| 9.  | O 2.4 | -56,0 | -58,2 | -59,7 | -55,3 | -56,9 | -57,8 | -52,5 | -53,2 | -53,3 | -53,1 | -54,1 | -54,8 | -50,9 | -51,2 | -58,0 |
| 10. | O 2.5 | -53,7 | -55,9 | -57,5 | -53,3 | -55,1 | -56,2 | -51,4 | -52,2 | -52,5 | -51,9 | -52,9 | -53,6 | -50,5 | -50,7 | -57,0 |

Jeżeli weźmiemy pod uwagę balkony z obudową lekką, zastąpienie oszkleń na ścianach bocznych przegrodami pełnymi zwiększa potrzeby energetyczne przede wszystkim na skutek pozyskiwania mniejszej ilości energii słonecznej w sezonie grzewczym (rys. 6.36). Obudowy izolowane wykazują odwrotną tendencję kiedy balkon jest skierowany na południe – tutaj ważniejsze jest zmniejszenie strat ciepła dzięki większej powierzchni ścian pełnych.

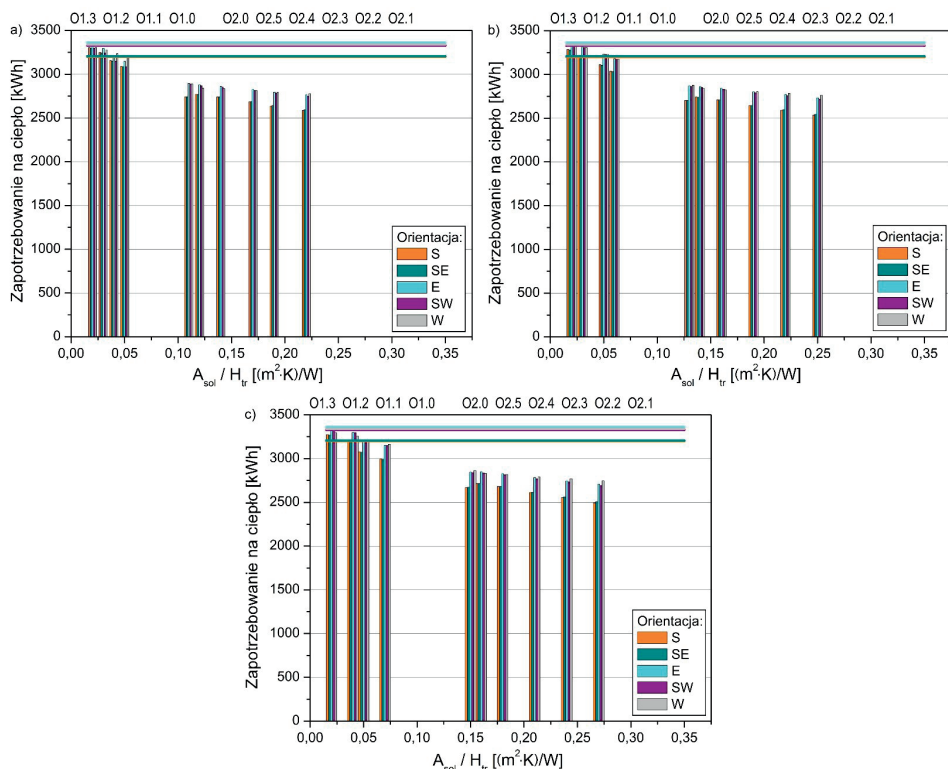


**Rys. 6.36.** Calkowite zapotrzebowanie na energię w strefie 2 w zależności od liczby oszklonych ścian obudowy. Mieszkanie w części skrajnej budynku, wysokość oszklelenia 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

### Strefa 2 i 3

Zapotrzebowanie na ciepło w całym mieszkaniu jest w mniejszym stopniu zależne od kierunku, w którym zwrócony jest balkon. Orientacja południowa i południowo wschodnia są uprzywilejowane pod względem konwersji promieniowania, dla pozostałych kierunków wykorzystanie energii słonecznej jest mniej

skuteczne (rys. 6.37). Średnie różnice pomiędzy obiema grupami wynoszą około 5%. Największe oszczędności energetyczne w stosunku do mieszkania z otwartym balkonem wynoszą 22% i są mniejsze niż w mieszkaniach w części środkowej budynku. Oszklenia jednoszybowe o przepuszczalności promieniowania mniejszej niż 0,5 (O 1.2, O 1.3) mogą zwiększyć zapotrzebowanie na ciepło ponad poziom charakteryzujący mieszkanie bez systemu szklarniowego (tabela 6.26).

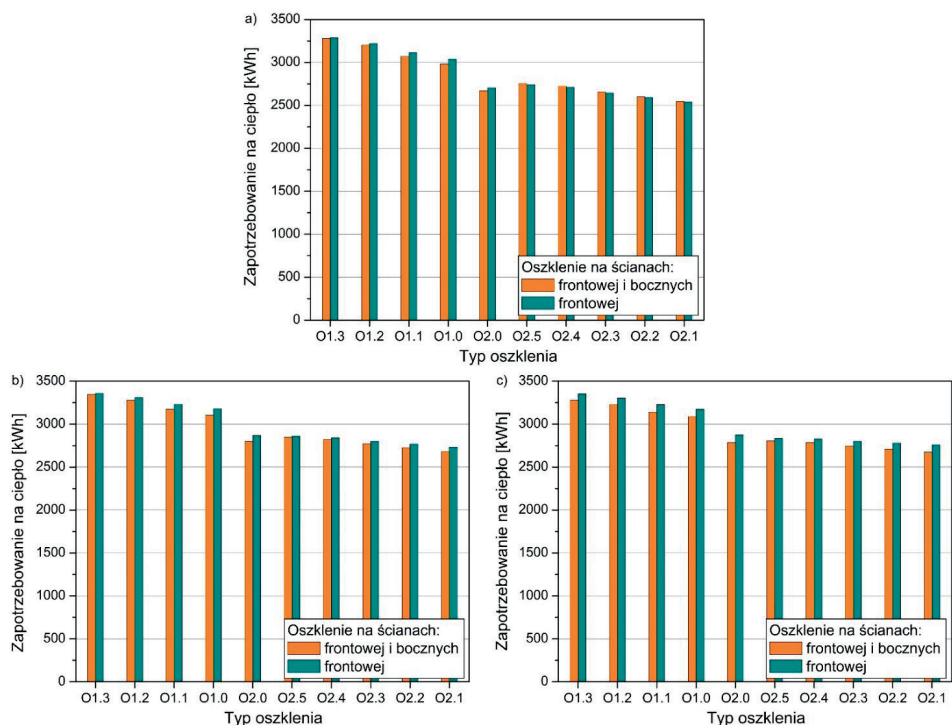


**Rys. 6.37.** Zapotrzebowanie na ciepło w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

Podobnie jak w strefie 2, w grupie obudów z oszkleniami jednoszybowymi usunięcie okien ze ścian bocznych balkonu powoduje niewielki wzrost zapotrzebowania na ciepło w mieszkaniu (nie przekraczający 3%). W grupie oszkleń dwuszybowych z powłokami spektralnie selektywnymi zabieg ten może nieznacznie zmniejszyć zapotrzebowania na ciepło, jeżeli balkon skierowany jest na południe lub południowy wschód (rys. 6.38).

**Tabela 6.26.** Zmiana zapotrzebowania na ciepło w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2 i 3, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

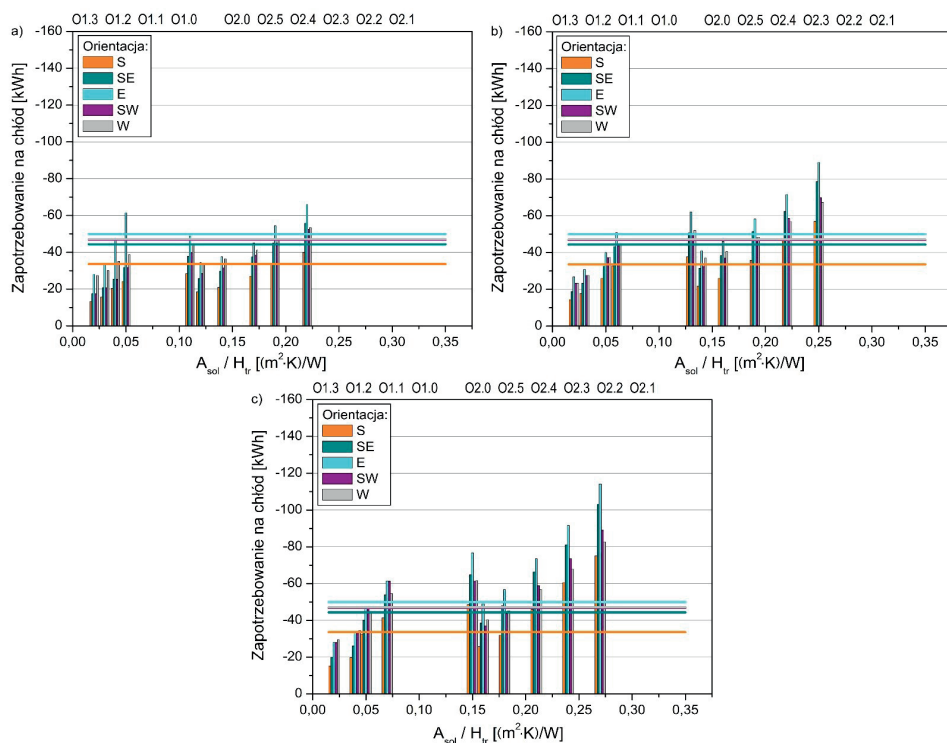
| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -3,3               | -5,1  | -6,4  | -3,8               | -5,5  | -6,7  | -6,2               | -5,4  | -6,2  | -7,2               | -4,6  | -5,3  | -4,1               | -5,0  | -5,4  |
| 2.  | O 1.1         | -1,3               | -2,7  | -3,7  | -1,7               | -3,2  | -4,2  | -4,5               | -3,8  | -4,5  | -5,3               | -2,9  | -3,5  | -3,1               | -3,4  | -4,2  |
| 3.  | O 1.2         | 1,6                | 0,7   | 0,1   | 1,1                | 0,2   | -0,4  | -1,9               | -1,5  | -1,9  | -2,5               | -0,6  | -0,9  | -1,9               | -1,1  | -2,5  |
| 4.  | O 1.3         | 3,3                | 2,8   | 2,4   | 2,9                | 2,3   | 1,9   | -0,3               | -0,1  | -0,3  | -0,8               | 0,8   | 0,7   | -1,1               | 0,3   | -1,4  |
| 5.  | O 2.0         | -14,2              | -15,5 | -16,6 | -14,5              | -15,7 | -16,7 | -13,8              | -14,7 | -15,3 | -13,2              | -14,0 | -14,7 | -13,5              | -13,9 | -14,3 |
| 6.  | O 2.1         | -19,1              | -20,7 | -22,0 | -19,2              | -20,6 | -21,9 | -17,7              | -18,7 | -19,5 | -17,3              | -18,3 | -19,1 | -16,9              | -17,4 | -17,8 |
| 7.  | O 2.2         | -17,6              | -19,0 | -20,1 | -17,7              | -19,0 | -20,1 | -16,8              | -17,6 | -18,3 | -16,3              | -17,2 | -17,9 | -16,3              | -16,7 | -17,1 |
| 8.  | O 2.3         | -16,1              | -17,3 | -18,3 | -16,3              | -17,5 | -18,4 | -15,9              | -16,6 | -17,2 | -15,4              | -16,2 | -16,8 | -15,8              | -16,1 | -16,4 |
| 9.  | O 2.4         | -14,3              | -15,3 | -16,2 | -14,5              | -15,6 | -16,4 | -14,9              | -15,5 | -15,9 | -14,3              | -14,9 | -15,4 | -15,2              | -15,4 | -15,7 |
| 10. | O 2.5         | -13,4              | -14,3 | -15,1 | -13,7              | -14,6 | -15,3 | -14,3              | -14,9 | -15,3 | -13,7              | -14,3 | -14,7 | -14,9              | -15,2 | -15,3 |



**Rys. 6.38.** Zapotrzebowanie na ciepło w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od liczby oszklonych ścian obudowy. Mieszkanie w części skrajnej budynku, wysokość oszklenia 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

Oszklenia pojedyncze w przeważającej mierze nie powodują wzrostu zapotrzebowania na chłód ponad poziom charakteryzujący mieszkanie z otwartym balkonem (tabela 6.27). Wśród obudów z oszkleniami podwójnymi efekt końcowy jest uzależniony od powierzchni i przepuszczalności zestawów szyb, z tym że oszklenia o dużej przepuszczalności (O 2.1 i O.2.2) zwiększają zapotrzebowanie na chłód niezależnie od wysokości i orientacji (rys. 6.39).

Kierunki południowy i wschodni są odpowiednio najlepsze i najgorsze jeżeli weźmiemy pod uwagę sezon chłodniczy, a obrót balkonu względem stron świata może zwiększyć zapotrzebowanie na energię od 45% do 156% (obudowy nieizolowane z oszkleniami jednoszybowymi), i od około 51% do 90% (obudowy izolowane z oszkleniami dwuszybowymi).



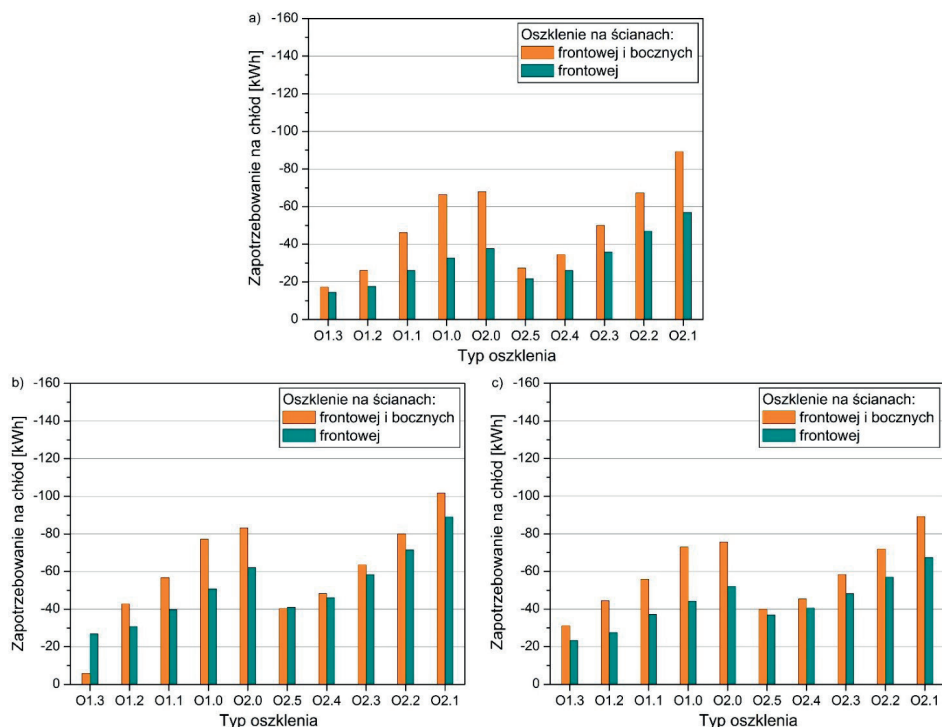
**Rys. 6.39.** Zapotrzebowanie na chłód w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

Podobnie jak w strefie 2, usunięcie oszklenia ze ścian bocznych zmniejsza zapotrzebowanie na chłód (poza oszkleniem typu O 2.5 skierowanym na wschód). Redukcja powierzchni oszklenia przynosi większe efekty w przypadku obudów lekkich jednoszybowych (rys. 6.40).



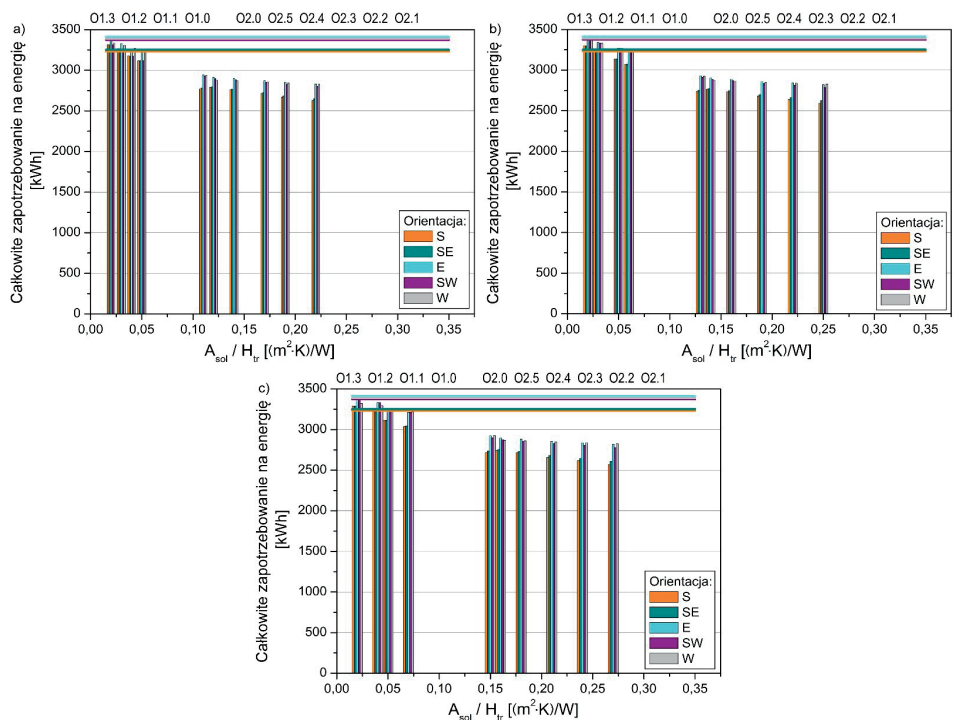
**Tabela 6.27.** Zmiana zapotrzebowania na chłód w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2 i 3, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |                    |       |       |
|-----|---------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|     |               | S                  |       |       | SE                 |       |       | E                  |       |       | SW                 |       |       | W                  |       |       |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       | Wys. oszklenia [m] |       |       |
|     |               | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  | 1,80               | 2,20  | 2,60  |
| 1.  | O 1.0         | -28,5              | -2,7  | 23,2  | -28,3              | -2,6  | 21,4  | 23,1               | 1,8   | 23,1  | -32,1              | -5,5  | 31,1  | -17,9              | -6,2  | 15,7  |
| 2.  | O 1.1         | -39,1              | -22,5 | -3,3  | -42,7              | -26,5 | -9,3  | -5,9               | -20,3 | -5,9  | -45,8              | -20,5 | 0,3   | -25,6              | -21,0 | -5,3  |
| 3.  | O 1.2         | -53,4              | -47,5 | -41,0 | -53,2              | -47,2 | -41,0 | -33,4              | -38,4 | -33,4 | -55,7              | -41,2 | -29,0 | -36,3              | -41,6 | -27,0 |
| 4.  | O 1.3         | -60,4              | -57,1 | -54,6 | -60,6              | -57,5 | -54,9 | -43,8              | -46,3 | -43,8 | -62,7              | -50,3 | -40,1 | -41,9              | -50,7 | -37,6 |
| 5.  | O 2.0         | -15,3              | 12,3  | 44,6  | -14,6              | 14,4  | 46,3  | -1,9               | 24,5  | 53,8  | -15,0              | 7,3   | 30,9  | -7,0               | 10,5  | 30,5  |
| 6.  | O 2.1         | 19,3               | 69,9  | 123,8 | 25,8               | 77,2  | 132,5 | 31,9               | 78,3  | 128,7 | 12,0               | 49,3  | 90,1  | 13,1               | 42,9  | 75,4  |
| 7.  | O 2.2         | 1,1                | 40,0  | 80,6  | 1,4                | 40,5  | 82,7  | 9,2                | 43,3  | 83,5  | -3,6               | 25,1  | 57,1  | -1,3               | 20,7  | 43,8  |
| 8.  | O 2.3         | -19,4              | 7,0   | 37,3  | -15,5              | 15,8  | 49,4  | -9,9               | 16,8  | 47,3  | -18,1              | 2,7   | 25,7  | -12,7              | 2,2   | 20,3  |
| 9.  | O 2.4         | -37,7              | -22,5 | -5,0  | -33,1              | -13,7 | 8,1   | -24,6              | -7,5  | 13,4  | -32,7              | -21,1 | -7,0  | -22,8              | -14,1 | -4,1  |
| 10. | O 2.5         | -45,0              | -35,2 | -23,1 | -42,1              | -29,1 | -12,9 | -31,1              | -17,8 | -1,8  | -39,1              | -30,5 | -21,2 | -28,4              | -21,7 | -14,5 |



**Rys. 6.40.** Zapotrzebowanie na chłód w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od liczby oszklonych ścian obudowy. Mieszkanie w części skrajnej budynku, wysokość oszklenia 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

Rozpatrując całkowite zapotrzebowanie na energię, oszczędności energetyczne w odniesieniu do mieszkania z balkonem otwartym nie przekroczyły 20%, i poza pojedynczymi przypadkami obudów lekkich z oszkleniami typu O 1.2 i O 1.3 system pasywny zmniejsza zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu (tabela 6.28). Podobne wyniki uzyskano dla orientacji balkonów południowej i południowo-wschodniej oraz kierunków pozostałych (rys. 6.41).



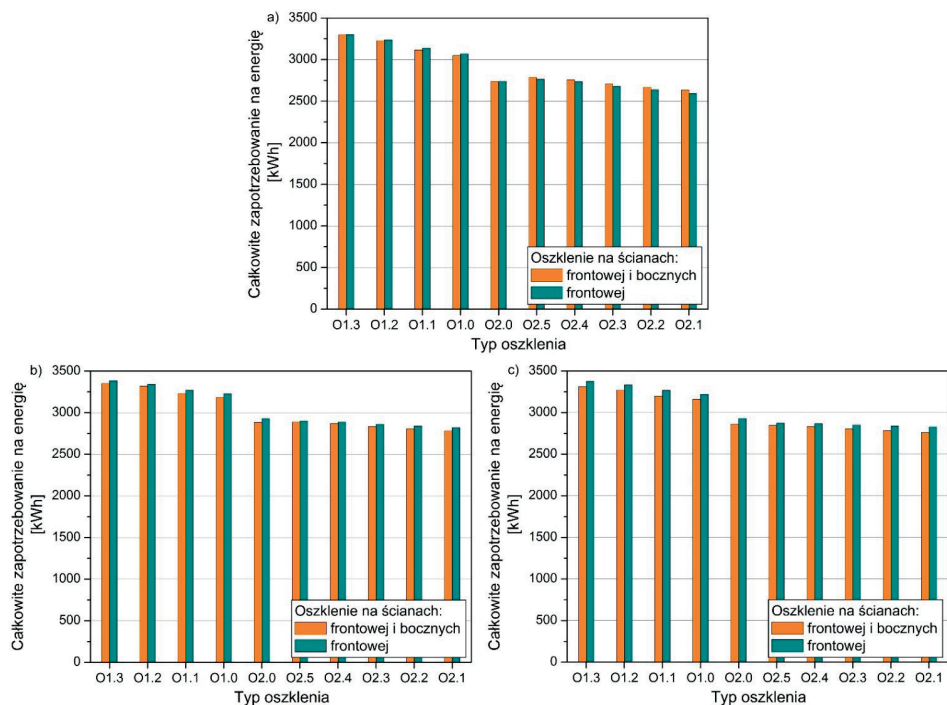
**Rys. 6.41.** Całkowite zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od orientacji balkonu. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, wysokość oszklenia: a) 1,80 m, b) 2,20 m, c) 2,60 m. Słupki oznaczają zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu z zabudowanym balkonem, linie – w mieszkaniu z balkonem otwartym.

**Tabela 6.28.** Zmiana całkowitego zapotrzebowania na energię w stosunku do mieszkania z balkonem otwartym [%]. Strefa 2 i 3, mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie balkonu (kolorem niebieskim zaznaczono wariant najmniej korzystny, a żółtym – najbardziej korzystny).

| Lp. | Typ oszklenia | Orientacja balkonu |      |      |                    |      |      |                    |      |      |                    |      |      |
|-----|---------------|--------------------|------|------|--------------------|------|------|--------------------|------|------|--------------------|------|------|
|     |               | S                  |      |      | SE                 |      |      | E                  |      |      | SW                 |      |      |
|     |               | Wys. oszklenia [m] |      |      | Wys. oszklenia [m] |      |      | Wys. oszklenia [m] |      |      | Wys. oszklenia [m] |      |      |
| 1.  | O 1.0         | 1,80               | 2,20 | 2,60 | 1,80               | 2,20 | 2,60 | 1,80               | 2,20 | 2,60 | 1,80               | 2,20 | 2,60 |
|     |               | -3,6               | -5,1 | -6,1 | -4,1               | -5,5 | -6,4 | -5,8               | -5,3 | -5,8 | -7,6               | -4,6 | -4,8 |
|     |               |                    |      |      |                    |      |      |                    |      |      |                    | -4,2 | -5,0 |
|     |               |                    |      |      |                    |      |      |                    |      |      |                    |      | -5,1 |

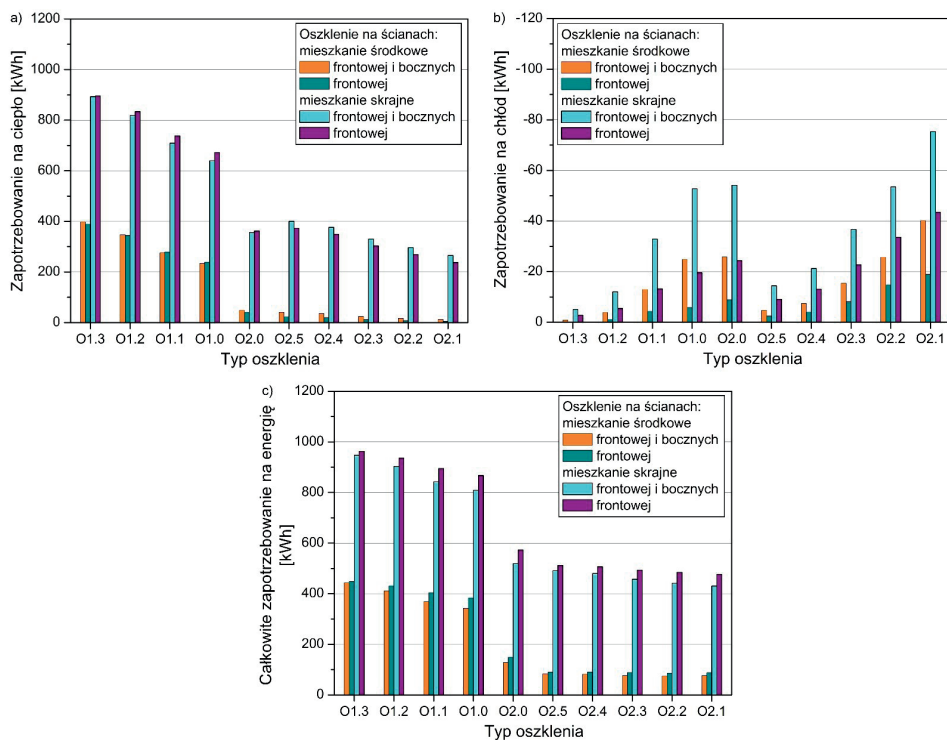
|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.  | O 1.1 | -1,7  | -2,9  | -3,7  | -2,3  | -3,5  | -4,3  | -4,5  | -4,1  | -4,5  | -5,8  | -3,2  | -3,5  | -3,4  | -3,6  | -4,2  |
| 3.  | O 1.2 | 1,0   | 0,2   | -0,4  | 0,4   | -0,4  | -1,0  | -2,4  | -2,0  | -2,4  | -3,3  | -1,2  | -1,3  | -2,3  | -1,6  | -2,8  |
| 4.  | O 1.3 | 2,6   | 2,1   | 1,8   | 2,0   | 1,5   | 1,1   | -0,9  | -0,7  | -0,9  | -1,7  | 0,1   | 0,1   | -1,7  | -0,4  | -1,9  |
| 5.  | O 2.0 | -14,3 | -15,2 | -15,9 | -14,5 | -15,3 | -15,8 | -13,7 | -14,1 | -14,3 | -13,2 | -13,7 | -14,0 | -13,4 | -13,6 | -13,7 |
| 6.  | O 2.1 | -18,7 | -19,8 | -20,5 | -18,5 | -19,3 | -19,8 | -17,0 | -17,3 | -17,3 | -16,9 | -17,3 | -17,6 | -16,5 | -16,6 | -16,5 |
| 7.  | O 2.2 | -17,4 | -18,4 | -19,1 | -17,4 | -18,2 | -18,7 | -16,4 | -16,7 | -16,8 | -16,2 | -16,6 | -16,8 | -16,1 | -16,2 | -16,3 |
| 8.  | O 2.3 | -16,1 | -17,1 | -17,8 | -16,3 | -17,0 | -17,5 | -15,8 | -16,1 | -16,3 | -15,4 | -15,9 | -16,2 | -15,8 | -15,9 | -15,9 |
| 9.  | O 2.4 | -14,5 | -15,4 | -16,1 | -14,8 | -15,5 | -16,1 | -15,0 | -15,3 | -15,5 | -14,5 | -15,0 | -15,3 | -15,3 | -15,4 | -15,5 |
| 10. | O 2.5 | -13,7 | -14,5 | -15,2 | -14,1 | -14,8 | -15,3 | -14,6 | -14,9 | -15,1 | -14,1 | -14,5 | -14,8 | -15,1 | -15,3 | -15,3 |

Sumaryczne zapotrzebowanie na energię kształtuje się na zbliżonym poziomie, jak w wariantach z oszkleniem na trzech ścianach (rys. 6.42). Oszklenie na ścianie frontowej jest nieco lepszym rozwiązaniem dla obudów izolowanych, jeżeli balkon skierowany jest na południe lub południowy wschód. W pozostałych przypadkach korzystniejsze jest umieszczenie oszkleń na wszystkich ścianach obudowy.



**Rys. 6.42.** Całkowite zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od liczby oszklonych ścian obudowy. Mieszkanie w części skrajnej budynku, wysokość oszklenia 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

Zależności jakościowe zaobserwowane dla mieszkań położonych w skrajnej części budynku są podobne do wyników uzyskanych dla mieszkań w jego środkowej części. Pod względem ilościowym, wprowadzenie systemu pasywnego daje mniejsze oszczędności energii niż miało to miejsce w mieszkaniach o dwóch przegrodach zewnętrznych. Sumaryczne zapotrzebowanie na energię (ciepło i chłód) w mieszkaniach zlokalizowanym w skrajnej części budynku jest dwu- do trzykrotnie większe w porównaniu z mieszkaniem w segmencie środkowym (rys. 6.43). W sezonie grzewczym przyczyniają się do tego dwie dodatkowe przegrody zewnętrzne, czyli dach i ściana boczna. W sezonie chłodniczym, pokrycie dachu o barwie czarnej powoduje zwiększoną absorpcję promieniowania słonecznego, czego nie kompensują większe straty ciepła przez przegrody stykające się z powietrzem zewnętrznym.



**Rys. 6.43.** Zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu (strefa 2 i 3) w zależności od typu mieszkania, wysokość oszklenia 2,20 m, orientacja południowa: a) zapotrzebowanie na ciepło, b) zapotrzebowanie na chłód, c) całkowite zapotrzebowanie na energię.

## 7. Efektywność systemów szklarniowych

System pasywny największy wpływ wywiera na warunki panujące w pomieszczeniu bezpośrednio sąsiadującym z przestrzenią słoneczną. Analizując bilans ciepła w strefie 2 można dokonać bardziej szczegółowej oceny efektywności szklarni, pomijając w znacznej mierze oddziaływanie systemu zysków bezpośrednich z jakim mamy do czynienia w pozostałej części mieszkania (strefa 3). Czynniki wyrażające ilościowo skuteczność konwersji energii promieniowania słonecznego, którymi posłużono się w pracy, to sprawność energetyczna  $\eta$  i czynnik korekty temperatury  $b_{tr}$ .

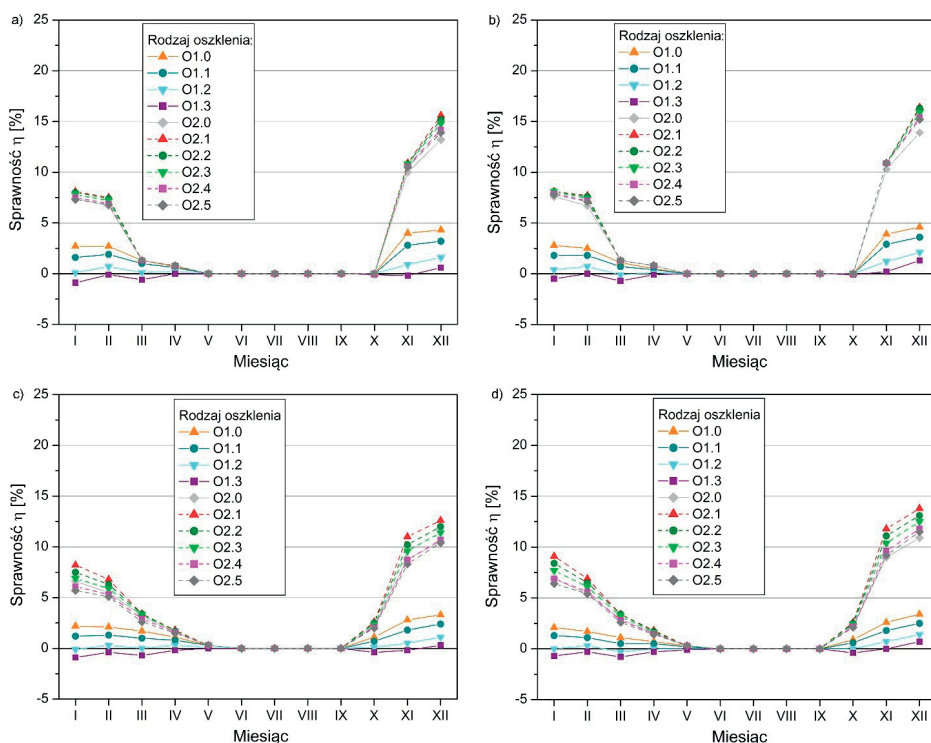
### 7.1. Sprawność energetyczna

Zaproponowana poniżej metoda określenia efektywności energetycznej systemu szklarniowego umożliwiła określenie, jaka część promieniowania słonecznego docierającego do kolektora szklarniowego zostaje skutecznie wykorzystana w pomieszczeniu sąsiadującym z przestrzenią słoneczną. Odnosi się ona do natężenia promieniowania słonecznego padającego na zewnętrzną powierzchnię obudowy i pozwala na uwzględnienie zróżnicowanych właściwości optycznych oszkleń. Dotychczasowe sposoby ustalania efektywności energetycznej pomijały te zagadnienia, oceniając najczęściej skuteczność konwersji promieniowania już przepuszczonego do wnętrza szklarni przez oszklenia zwykłe. Ze względu na bardzo dynamiczny rozwój technik modyfikacji spektralnych właściwości szkła okiennego potrzebna jest metoda, która uwzględniałaby efekty stosowania powłok selektywnych. Jednocześnie powinna ona pozwolić na wstępne oszacowanie, jakich oszczędności można oczekiwać projektując budynek z systemem szklarniowym.

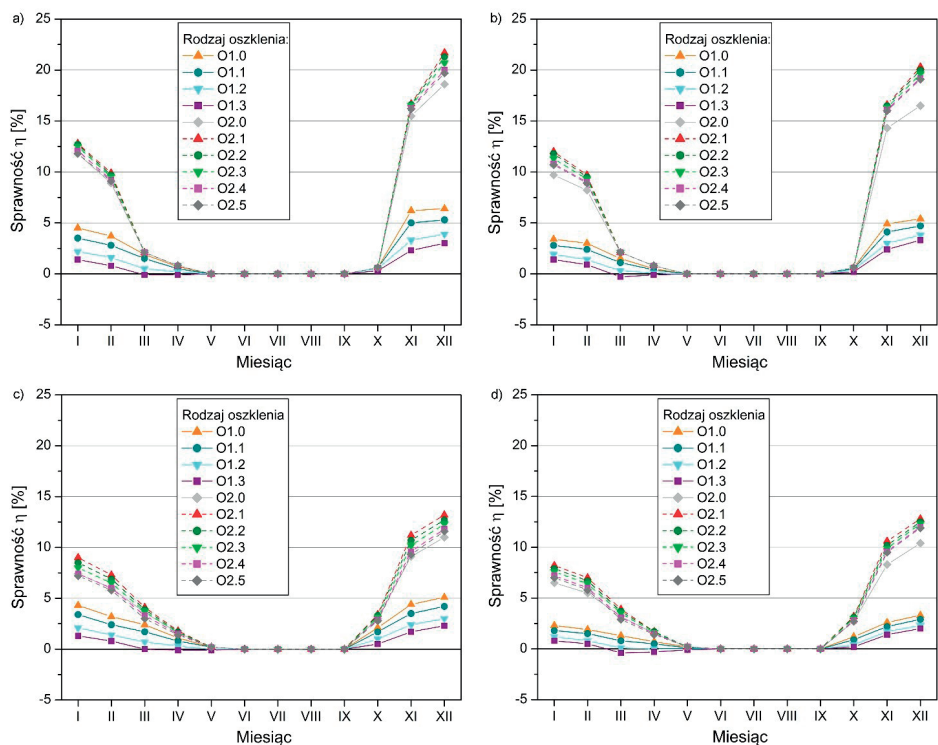
Szklarnia modyfikuje bezpośrednio zyski słoneczne w pomieszczeniu, ale też dostarcza ciepło w postaci promieniowania długofalowego dzięki efektowi buforowemu i ogrzewaniu powietrza wentylacyjnego. Aby uwzględnić wszystkie te składowe, jako ciepło użyteczne przyjęto różnicę pomiędzy zapotrzebowaniem na ciepło w pomieszczeniu bazowym (sąsiadującym z balkonem otwartym) i pomieszczeniu sąsiadującym z zabudowaną przestrzenią słoneczną. Sprawność  $\eta$  jest stosunkiem ciepła użytecznego i energii dostarczonej do kolektora [161],

czyli promieniowania słonecznego docierającego do obudowy w określonym czasie. Wybrane wyniki przedstawiono dla pośredniej wysokości oszklenia (2,20 m), ponieważ wpływ wysokości oszklenia na sprawność systemu okazał się bardzo niewielki.

Zmiana sprawności podczas sezonu grzewczego jest związana z podażą promieniowania słonecznego i różnicą temperatury między pomieszczeniami ogrzewanymi a środowiskiem zewnętrznym [144]. Przyjmuje ona mniejsze wartości w okresach przejściowych, a rośnie w miesiącach zimowych (rys. 7.1 – 7.3), osiągając maksimum w grudniu.

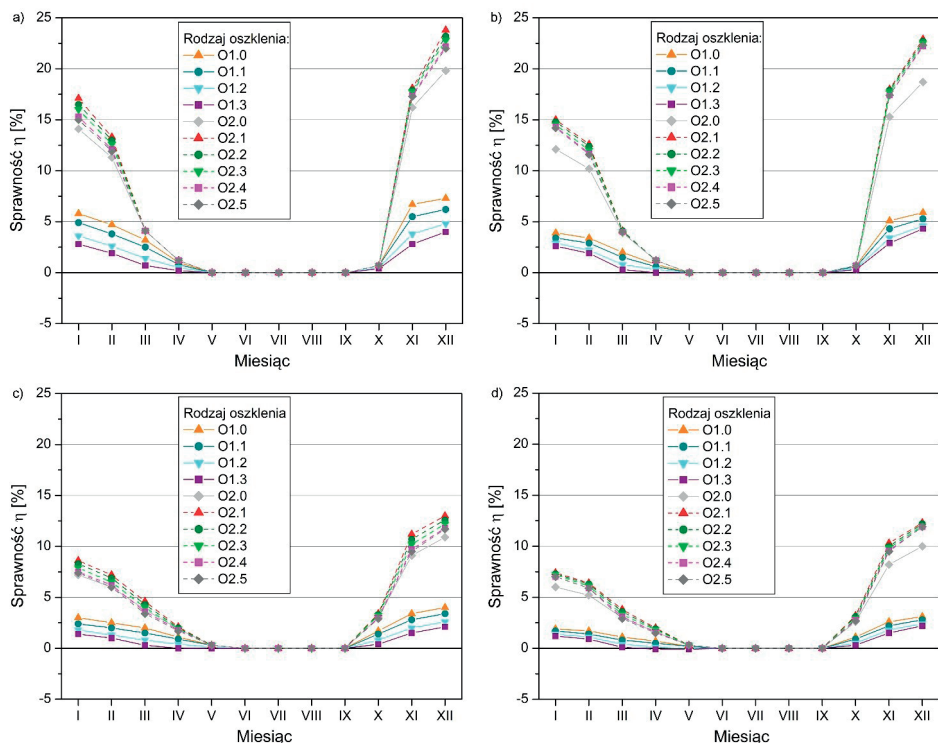


**Rys. 7.1.** Sprawności miesięczne systemu szklarniowego, balkon skierowany na południe, wysokość oszklenia 2,20 m: a) mieszkanie w części środkowej, oszklenie na 3 ścianach obudowy, b) mieszkanie w części środkowej, oszklenie na 1 ścianie obudowy, c) mieszkanie w części skrajnej, oszklenie na 3 ścianach obudowy, d) mieszkanie w części skrajnej, oszklenie na 1 ścianie obudowy.



**Rys. 7.2.** Sprawności miesięczne systemu szklarniowego, balkon skierowany na wschód, wysokość oszklenia 2,20 m: a) mieszkanie w części środkowej, oszklenie na 3 ścianach obudowy, b) mieszkanie w części środkowej, oszklenie na 1 ścianie obudowy, c) mieszkanie w części skrajnej, oszklenie na 3 ścianach obudowy, d) mieszkanie w części skrajnej, oszklenie na 1 ścianie obudowy.



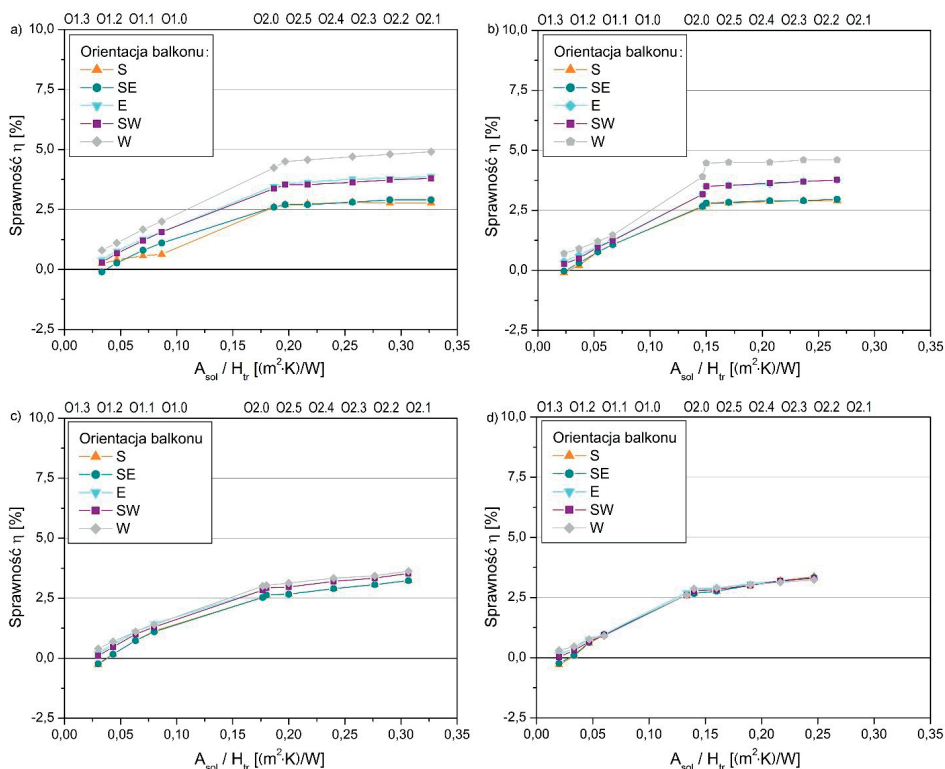


**Rys. 7.3.** Sprawności miesięczne systemu szklarniowego, balkon skierowany na zachód, wysokość oszklenia 2,20 m: a) mieszkanie w części środkowej, oszklenie na 3 ścianach obudowy, b) mieszkanie w części środkowej, oszklenie na 1 ścianie obudowy, c) mieszkanie w części skrajnej, oszklenie na 3 ścianach obudowy, d) mieszkanie w części skrajnej, oszklenie na 1 ścianie obudowy.

Zdolność konwersji promieniowania jest znacznie większa, jeżeli zastosowane zostały obudowy izolowane z oszkleniami dwuszybowymi, co jest zgodne z wynikami analiz zawartymi w rozdziale 6. W obu grupach najlepsze efekty dały oszklenia o największej przepuszczalności promieniowania (typu O 2.1, O 2.2, O 2.3 i O 1.0, O 1.1). Systemy szklarniowe są bardziej wydajne w mieszkaniach w środkowej części budynku – w przypadku obudów izolowanych z oszkleniami podwójnymi maksymalna efektywność mieściła się w zakresie od 13,0% do 17,2% przy orientacji południowej i południowo-wschodniej, oraz od 16,6% do 23,8% dla pozostałych kierunków. Sprawność systemów z oszkleniami pojedynczymi nie przekraczała 7,5%, a w niektórych przypadkach okazała się ujemna, ponieważ obudowa balkonu powodowała wzrost zapotrzebowania na energię ograniczając zyski słoneczne w pomieszczeniu mieszkalnym. W mieszkaniach na najwyższej kondygnacji skuteczność konwersji promieniowania spada, i dla obudów izo-

lowanych mieści się w grudniu w przedziale od 10,4% do 14,2% a dla obudów nieizolowanych nie przekracza 5,1%.

Rozmieszczenie oszklenia ma raczej niewielki wpływ na skuteczność pozyskiwania energii słonecznej. Dla kierunku południowego i południowo-wschodniego nieco większą sprawność mają przestrzenie słoneczne z oszkloną jedynie ścianą frontową, dla pozostałych kierunków jest na odwrót.



**Rys. 7.4.** Średnia sprawność systemu szklarniowego podczas sezonu grzewczego: a) mieszkanie w części środkowej, oszklenie na 3 ścianach obudowy, b) mieszkanie w części środkowej, oszklenie na 1 ścianie obudowy, c) mieszkanie w części skrajnej, oszklenie na 3 ścianach obudowy, d) mieszkanie w części skrajnej, oszklenie na 1 ścianie obudowy.

Sprawności uśrednione z całego sezonu grzewczego są znacznie mniejsze niż miesięczne, co wynika z większych sum natężenia promieniowania słonecznego (rys. 7.4). Orientacja balkonu wpływa w widoczny sposób na skuteczność konwersji promieniowania w przypadku mieszkań w środkowej części budynku – najmniej efektywne mają kolektory skierowane na południe i południowy wschód, pomimo najmniejszego zapotrzebowania na ciepło w mieszkaniu i największego

napromieniowania obudowy w sezonie grzewczym. Wielkości pośrednie osiągnąć są jeżeli balkon ma orientację wschodnią lub południowo-zachodnią, a największe – dla kierunku zachodniego, o najmniejszych sumach promieniowania docierającego do kolektora szklarniowego. Dla mieszkania na najwyższej kondygnacji różnice te są znacznie mniejsze.

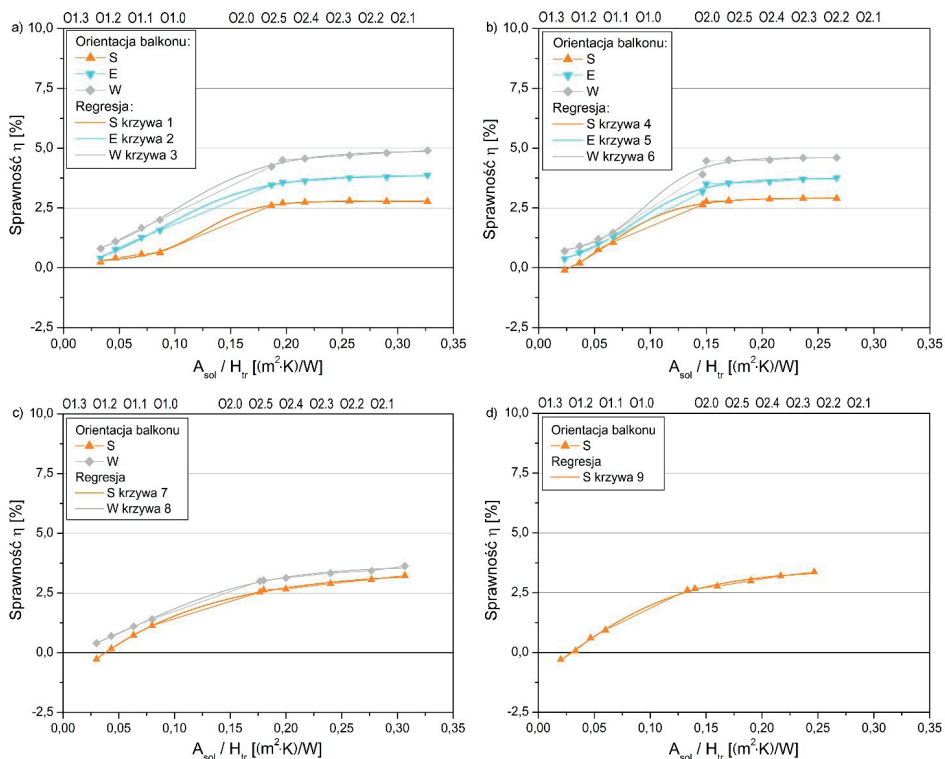
Powyższe dane posłużyły do utworzenia krzywych regresji w postaci krzywej S opisanej równaniem o ogólnej postaci ( $y = \eta$ ,  $x = A_{sol}/H_{tr}$ ):

$$y = \frac{a-b}{1+e^{(x-c)/d}} + b, \quad (7.1)$$

gdzie:

a, b, c, d – parametry dopasowania.

Kształt krzywej wybrano w taki sposób, aby uzyskać jak największy współczynnik determinacji  $R^2$ .



**Rys. 7.5.** Średnia sprawność systemu szklarniowego podczas sezonu grzewczego i krzywe regresji: a) mieszkanie w części środkowej, oszklecie na 3 ścianach obudowy, b) mieszkanie w części środkowej, oszklecie na 1 ścianie obudowy, c) mieszkanie w części skrajnej, oszklecie na 3 ścianach obudowy, d) mieszkanie w części skrajnej, oszklecie na 1 ścianie obudowy.

Ze względu na bardzo zbliżone wyniki dla kierunków południowego i południowo-wschodniego oraz wschodniego i południowo-zachodniego w mieszkaniu na kondygnacji powtarzalnej, równania regresji opracowano dla trzech orientacji balkonu: południowej, wschodniej i zachodniej (rys. 7.5). W przypadku mieszkania na najwyższej kondygnacji wyznaczono krzywe dla kierunku południowego i wschodniego (obudowa z oszkleniem na trzech ścianach) lub południowego (obudowa z oszkleniem na jednej ścianie).

Równania regresji mają następującą postać:

$$\text{Krzywa 1: } \eta = \frac{0,256 - 2,788}{1 + e^{(x-0,125)/0,024}} + 2,788 \quad R^2 = 0,998 \quad (7.1)$$

$$\text{Krzywa 2: } \eta = \frac{-0,496 - 3,867}{1 + e^{(x-0,089)/0,043}} + 3,867 \quad R^2 = 0,999 \quad (7.2)$$

$$\text{Krzywa 3: } \eta = \frac{-0,084 - 4,889}{1 + e^{(x-0,099)/0,044}} + 4,889 \quad R^2 = 0,999 \quad (7.3)$$

$$\text{Krzywa 4: } \eta = \frac{-0,944 - 2,913}{1 + e^{(x-0,062)/0,031}} + 2,913 \quad R^2 = 0,999 \quad (7.4)$$

$$\text{Krzywa 5: } \eta = \frac{-0,063 - 3,736}{1 + e^{(x-0,084)/0,031}} + 3,736 \quad R^2 = 0,997 \quad (7.5)$$

$$\text{Krzywa 6: } \eta = \frac{0,538 - 4,610}{1 + e^{(x-0,096)/0,024}} + 4,610 \quad R^2 = 0,995 \quad (7.6)$$

$$\text{Krzywa 7: } \eta = \frac{-52,097 - 3,420}{1 + e^{(x-0,232)/0,099}} + 3,420 \quad R^2 = 0,999 \quad (7.7)$$

$$\text{Krzywa 8: } \eta = \frac{1,361 - 3,639}{1 + e^{(x-0,066)/0,060}} + 3,639 \quad R^2 = 0,999 \quad (7.8)$$

$$\text{Krzywa 9: } \eta = \frac{-4,815 - 3,460}{1 + e^{(x-0,010)/0,060}} + 3,460 \quad R^2 = 0,998 \quad (7.9)$$

Przy pomocy powyższych równań, znając zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniu sąsiadującym z balkonem w mieszkaniu bazowym (z balkonem otwartym) można oszacować zapotrzebowanie na ciepło w tymże pomieszczeniu po zabudowie balkonu dla zadanej proporcji  $A_{\text{sol}}/H_{\text{tr}}$ , przy ustalonej lokalizacji mieszkania, rozmieszczeniu oszklenia i orientacji balkonu.

## 7.2. Czynniki korekty temperatury

Skuteczność systemu szklarniowego w pozyskiwaniu energii słonecznej jest powiązana także z czynnikiem korekty temperatury ( $b_{tr}$ ) między pomieszczeniem ogrzewanym, przestrzenią słoneczną i środowiskiem zewnętrznym. Zależy on od wzrostu temperatury w szklarni ponad temperaturę powietrza zewnętrznego, czyli odzwierciedla efekt buforowy nieklimatyzowanej przestrzeni oszklonej i możliwość zmniejszenia strat ciepła przez przegrodę pomiędzy szklarnią a strefą ogrzewaną [240]. Na podstawie wyników symulacji obliczono miesięczne czynniki korekty temperatury jako:

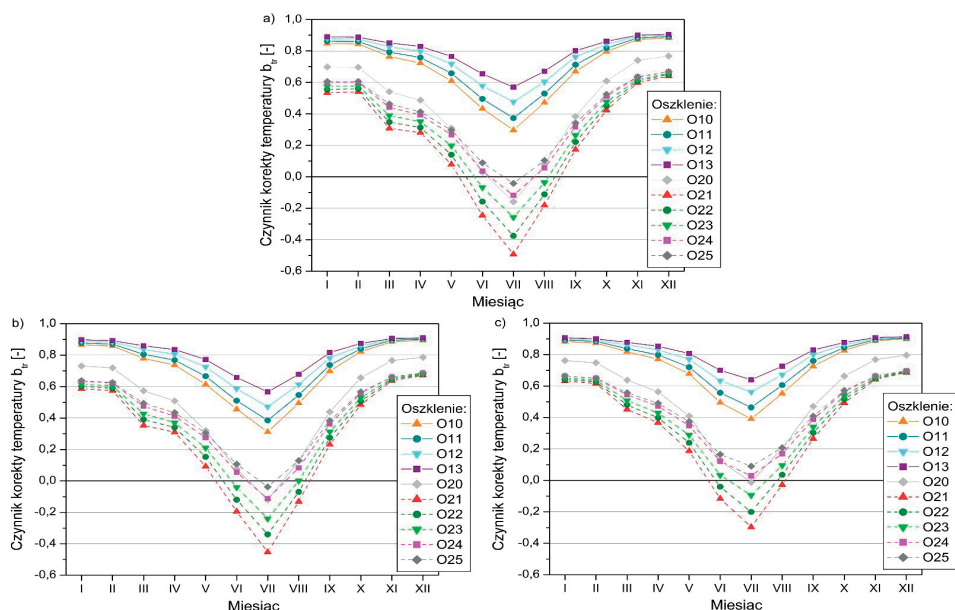
$$b_{tr} = \frac{\theta_i - \theta_s}{\theta_i - \theta_e} [-] \quad (7.10)$$

gdzie:

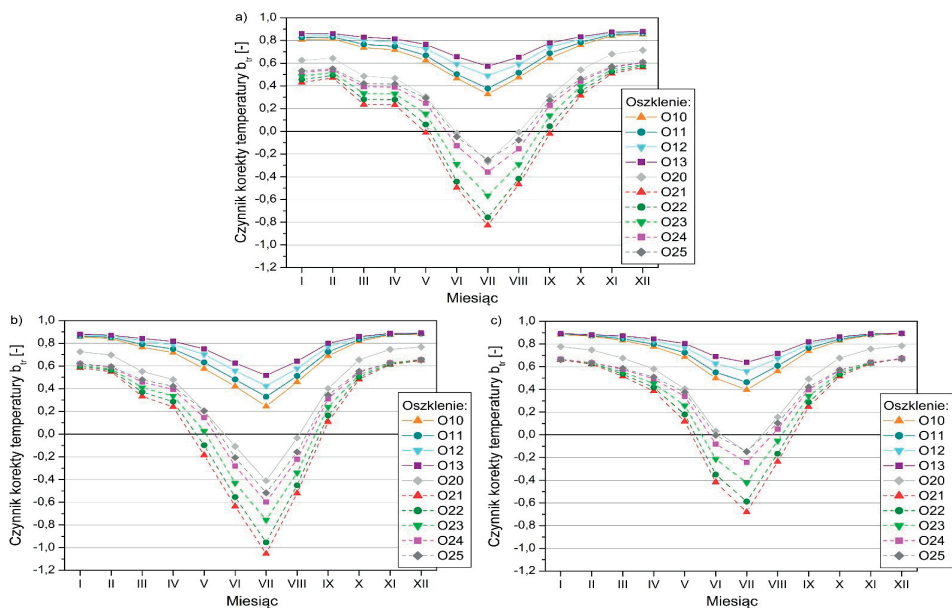
$\theta_i$  – średnia temperatura wewnętrzna w pomieszczeniu mieszkalnym sąsiadującym z balkonem w danym kroku obliczeniowym [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\theta_e$  – średnia temperatura zewnętrzna w danym kroku obliczeniowym [ $^{\circ}\text{C}$ ]

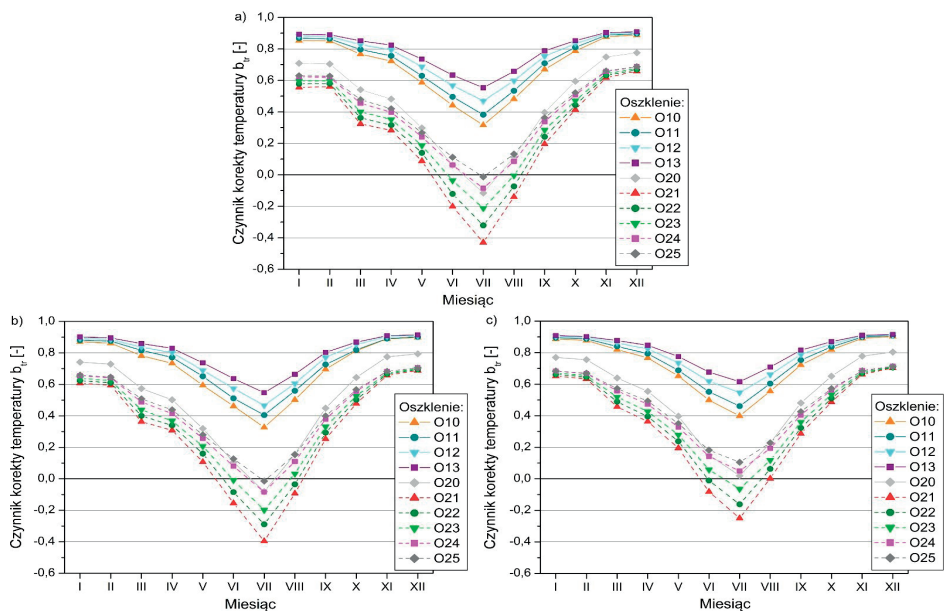
$\theta_s$  – średnia temperatura wewnętrzna w przestrzeni słonecznej w danym kroku obliczeniowym [ $^{\circ}\text{C}$ ].



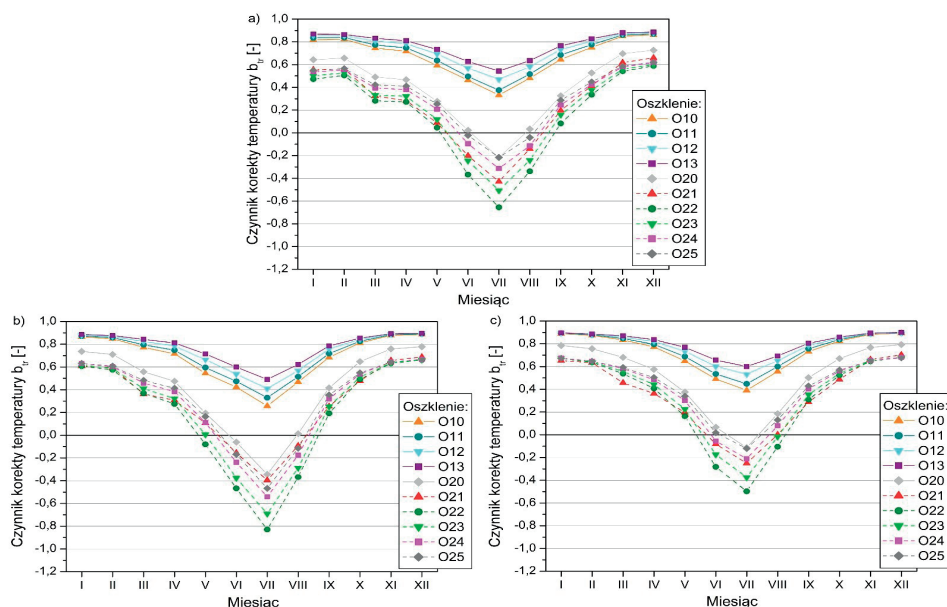
**Rys. 7.6.** Czynniki korekty temperatury  $b_{tr}$  w zależności od rodzaju oszklenia. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, wysokość oszklenia 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.



**Rys. 7.7.** Czynniki korekty temperatury  $b_{tr}$  w zależności od rodzaju oszkleń. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszkleń na 1 ścianie obudowy, wysokość oszkleń 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.



**Rys. 7.8.** Czynniki korekty temperatury  $b_{tr}$  w zależności od rodzaju oszkleń. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszkleń na 3 ścianach obudowy, wysokość oszkleń 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.



**Rys. 7.9.** Czynniki korekty temperatury  $b_{tr}$  w zależności od rodzaju oszkleń. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszkleń na 1 ścianie obudowy, wysokość oszkleń 2,20 m: a) balkon skierowany na południe, b) balkon skierowany na wschód, c) balkon skierowany na zachód.

Czynniki korekty temperatury są największe od listopada do lutego, w tym okresie przyjmują one wartości prawie stałe (rys. 7.6 – 7.9). W miesiącach wiosennych i jesiennych współczynniki stopniowo maleją, osiągając minimum w lipcu. Czynniki  $b_{tr}$  przyjmuje wartości największe dla obudów nieizolowanych z oszkleciami pojedynczymi (podczas zimy około 0,90), czyli wykazują one najmniejsze możliwości zmniejszenia strat ciepła z przyległego pomieszczenia. Dla obudów izolowanych z oszkleciami podwójnymi powlekanyymi czynniki korekty temperatury są mniejsze, z tym że sam przebieg roczny wykresów jest podobny. W czerwcu, lipcu i sierpniu czynnik  $b_{tr}$  może być ujemny, co oznacza że temperatura w obszarze balkonu przewyższa temperaturę pomieszczenia sąsiedniego. Tendencja ta jest bardziej widoczna wśród oszkleń o wyższej przepuszczalności promieniowania. W obu grupach oszkleń im większa przepuszczalność promieniowania, tym mniejsze czynniki korekty temperatury.

W sezonie grzewczym kierunek południowy i południowo wschodni pozwala uzyskać najmniejsze czynniki korekty temperatury, a samo zapotrzebowanie na ciepło w strefie 2 jest również najmniejsze. Najwyższe współczynniki, podobnie jak i największe zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniu sąsiadującym z balkonem, wyznaczono dla orientacji zachodniej.



Jeżeli balkon skierowany jest na zachód, także podczas lata czynniki korekty temperatury są największe. W tym czasie jest to jeden z kierunków (oprócz południowego) charakteryzujących się najmniejszym zapotrzebowaniem na chłodzenie. Najmniejsze wartości  $b_{tr}$  występują dla orientacji południowo-wschodniej lub wschodniej, powiązanych z największym zapotrzebowaniem na chłodzenie w strefie 2.

## **8. Możliwość przegrzewania mieszkań z systemem szklarniowym**

### **8.1. Kryteria oceny przegrzewania**

Temat zagrożeń związanych z podwyższonymi temperaturami w okresie letnim jest ostatnio szeroko dyskutowany w literaturze w powiązaniu ze zmianami klimatu, które Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) definiuje jako „zmiany które mogą być zidentyfikowane za pomocą testów statystycznych jako zmiany w wielkościach średnich lub zmienności parametrów klimatycznych, utrzymujących się przez dłuższy okres czasu (zwykle dziesięciolecia lub dłużej). Zmiany te mogą być wywołane procesami naturalnymi lub działalnością człowieka” [44]. Raport ten określa zmiany jako jednoznaczne, oceniając okres od 1983 do 2012 roku jako „prawdopodobnie najcieplejszy 30. letni okres na półkuli północnej”, podczas którego średni wzrost temperatury lądów i oceanów wyniósł 0,85°C. Jako podstawowe przyczyny ocieplenia uznano antropogeniczną emisję gazów cieplarnianych, powodującą w atmosferze wzrost stężenia dwutlenku węgla, metanu i tlenu azotu. Prognozuje się, że nieustająca emisja gazów cieplarnianych spowoduje dalsze ocieplenie i postępujące zmiany klimatyczne. W zależności od przyjętych scenariuszy emisyjnych, w okresie 2081 – 2100 możliwy jest wzrost temperatury od 1,5°C do 4,8°C [44]. Obserwowane obecnie zjawiska związane z ociepleniem to m. in. zmniejszenie ekstremów niskich temperatur, zwiększenie ekstremów wysokich temperatur i zwiększenie częstotliwości występowania fal upałów w wielu rejonach Europy, Azji i Australii.

Coraz większą wagę przywiązuje się w związku z tym do oceny komfortu użytkowania pomieszczeń w okresie letnim i możliwości ograniczenia przegrzewania w budynkach mieszkalnych bez konieczności stosowania mechanicznego chłodzenia [14, 25, 46, 50, 90, 174, 207, 208, 209, 228, 252, 253]. Tak zwane „miękkie” („soft” [46]) sposoby obniżenia temperatury w pomieszczeniach związane z określonymi zachowaniami użytkowników obejmują np. otwieranie okien, wietrzenie w okresie nocnym, zasłanianie okien, i nie generują większych kosztów. Z kolei metody ingerujące w konstrukcję budynku i określane jako „twarde” („hard” [46]) mogą być bardziej kosztowne i trudniejsze do wprowadzenia, szczególnie w obiektach już użytkowanych.

Różne dokumenty (przedstawione dalej w kolejności publikowania) proponują różne sposoby ilościowej oceny zjawiska jakim jest przegrzewanie w budynkach nieklimatyzowanych. Instrukcja brytyjskiej Chartered Institute of Building Services Engineers (CIBSE) z 2005 roku [291] określa stałe progi „ciepła” i „gorąca” jako 25 i 28°C dla pokoi dziennych (salonów) oraz 21 i 25°C dla sypialni, ze względu na fakt że jakość snu pogarsza się w temperaturze powyżej 24°C [68].

Norma EN 15251 „Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego dotyczące projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków, obejmujące jakość powietrza wewnętrznego, środowisko cieplne, oświetlenie i akustykę” [237] (wydana w 2007 i przyjęta jako polska norma w 2012 roku) wprowadza pojęcie „komfortu adaptacyjnego”, oparte na badaniach Humphreysa i Nicola [111]. Oznacza ono, że temperatura w której mieszkańcy czują się komfortowo zmienia się w zależności od średniej ciągłej temperatury powietrza zewnętrznego. Oceny dokonuje się na podstawie temperatury operatywnej, będącej średnią ważoną temperatury powietrza wewnętrznego i średniej temperatury promieniowania [248]. Ten sposób klasyfikacji zakłada, że temperatura w pomieszczeniach regulowana jest niskoenergetycznymi metodami pasywnymi, czyli głównie przez otwieranie lub zamykanie okien oraz stosowanie zasłon, żaluzji, wentylację nocną, itp. Letnie dopuszczalne temperatury opracowane zostały na podstawie badań prowadzonych w budynkach biurowych, lecz kryteria te mogą być także stosowane w budynkach mieszkalnych, w których aktywność fizyczna mieszkańców jest niewielka i mają oni możliwość zmiany odzieży na lżejszą lub cieplejszą. Projektując budynki należy też podać, przez jak długi czas temperatura wewnętrzna przekracza zalecane wielkości. Ocenę środowiska cieplnego można również przeprowadzić na podstawie wskaźników PMV/PPD (przewidywanej średniej oceny/przewidywanego odsetka osób niezadowolonych) zgodnie z normą EN ISO 7730 „Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego” [247], chociaż metoda ta zalecana jest przede wszystkim dla budynków z mechanicznym chłodzeniem.

Instytut Budownictwa Pasywnego określa przegrzewanie jako utrzymywanie się temperatury w pomieszczeniach powyżej 25°C przez ponad 10% roku [288]. Z kolei podręcznik CIBSE z 2006 roku [64] podaje, że wewnętrzna temperatura operatywna nie powinna przekraczać 26°C w sypialniach i 28°C w pokojach przez ponad 1% czasu użytkowania pomieszczeń. W 2015 roku zalecenia te zostały zmodyfikowane i aktualnie uznaje się, że mamy do czynienia z przegrzewaniem jeżeli wewnętrzna temperatura operatywna przekracza 25°C przez ponad 5% czasu użytkowania i 28°C przez ponad 1% czasu użytkowania [63]. Instrukcja CIBSE [297] definiuje przegrzewanie jeszcze inaczej – jako spełnienie co najmniej dwóch z trzech kryteriów oceny w okresie od 1 maja do 30 września: przekroczenie temperatury granicznej ustalonej w zależności od średniej ciągłej temperatury

zewnątrznej w ciągu ponad 3% czasu użytkowania, przekroczenie w ciągu dnia granicznego progu stopniogodzin lub określonej temperatury.

W dokumentach CIBSE zaleca się korzystanie z danych klimatycznych zawartych w tzw. Design Summer Years (DSY), czyli letnich latach projektowych, dostępnych dla 14 miejscowości na terenie Wielkiej Brytanii i reprezentujących lato cieplejsze niż przeciętnie [297]. DSY wprowadzono w 2002 roku, a najnowszą aktualizacja została opracowana w roku 2014 [56]. Metodyka wyboru DSY polegała na obliczeniu średniej temperatury powietrza zewnętrznego w okresie od kwietnia do września w co najmniej 20 latach (1983 – 2004) i uszeregowaniu lat zgodnie z tą daną. Jako rok projektowy wybierano ten, który mieścił się w górnym środkowym kwartylu dystrybucji (trzeci w kolejności najcieplejszy rok).

Norma EN 15251 [237] nie określa jednoznacznie, jakim zestawem danych klimatycznych należy się posługiwać. W tekście normy jest mowa o przygotowaniu danych dotyczących przegrzewania na potrzeby certyfikacji energetycznej oraz o ocenie komfortu letniego na podstawie pomiarów temperatury prowadzonych bezpośrednio w budynkach użytkowanych. Sugeruje to możliwość korzystania albo z typowych lat meteorologicznych (TRM), albo z rzeczywistych danych pomiarowych. Ta niejasność może mieć znaczący wpływ na otrzymane wyniki, ponieważ symulacje warunków letnich przeprowadzane na podstawie TRM dają niższe temperatury w pomieszczeniach i mniejsze zapotrzebowanie na chłód w porównaniu z symulacjami wykorzystującymi rzeczywiste dane klimatyczne uzyskane po 2000 roku [78, 79].

W pracy posłużono się metodą oceny możliwości przegrzewania zawartą w normie [237], zgodnie z kryteriami „komfortu adaptacyjnego”. Celem symulacji była ocena, czy pasywne środki pozwalające na obniżenie temperatury w pomieszczeniach, takie jak wietrzenie pomieszczeń czy zasłanianie okien, pozwolą na utrzymanie wewnętrznych warunków w wybranej kategorii środowiskowej bez uruchamiania mechanicznego chłodzenia.

Średnią ciągłą temperatury zewnętrznej obliczono zgodnie z [237] jako:

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot (\theta_{ed-1} + \alpha \cdot \theta_{ed-2} + \alpha \cdot \theta_{ed-3}^2) = (1 - \alpha) \cdot \theta_{ed-1} + \alpha \cdot \theta_{rm-1}, \quad (6.1)$$

gdzie:

$\theta_{rm}$  – ciągła średnia temperatura w danym dniu [°C],

$\theta_{rm-1}$  – ciągła średnia temperatura w dniu poprzednim [°C],

$\theta_{ed-1}$  – dobową średnia temperatura w dniu poprzednim [°C],

$\theta_{ed-2}$  – dobową średnia temperatura dwa dni wcześniej, itd. [°C],

$\alpha$  – stała przyjmująca wartości między 0 a 1, zalecane wg [237] jest przyjęcie wartości 0,8 [-].

Jako temperaturę komfortu przyjmuje się  $\theta_c$  [25, 92]:

$$\theta_c = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8. \quad (6.2)$$

Norma określa cztery kategorie środowiska wewnętrznego, różniące się poziomem oczekiwań użytkowników i dopuszczalnymi odchyleniami od temperatury komfortu (tabela 8.1). Uznaje się, że parametry środowiska wewnętrznego spełniają wymagania określonej kategorii, jeżeli nie przekraczają one wartości granicznych przez więcej niż 3% (lub 5%) godzin użytkowania (tabela 8.2).

**Tabela 8.1.** Kategorie środowiska wewnętrznego, wg [237].

| Kategoria | Opis                                                                                                                                                                                                    | Dopuszczalne odchylenie od temperatury komfortu [°C] |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| I         | Wysoki poziom oczekiwań, zalecany dla pomieszczeń użytkowanych przez osoby bardzo wrażliwe i wrażliwe o specjalnych wymaganiach, np. osoby niepełnosprawne, chorzy, bardzo małe dzieci i osoby starsze. | $\pm 2$                                              |
| II        | Normalny poziom oczekiwań, zalecany w przypadku nowych i modernizowanych budynków.                                                                                                                      | $\pm 3$                                              |
| III       | Dopuszczalny, umiarkowany poziom oczekiwań, który może być stosowany w przypadku istniejących budynków.                                                                                                 | $\pm 4$                                              |
| IV        | Wartości nie mieszczące się w kryteriach powyższych kategorii. Zaleca się przyjmowanie tej kategorii tylko w odniesieniu do ograniczonej części roku.                                                   | $> 4$                                                |

Wartości graniczne temperatury w poszczególnych kategoriach środowiska przyjęto jako:

kategoria I – górna wartość graniczna:  $\theta_{i\max} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 2$ ,

dolna wartość graniczna:  $\theta_{i\min} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 2$ ,

kategoria II – górna wartość graniczna:  $\theta_{i\max} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 3$ ,

dolna wartość graniczna:  $\theta_{i\min} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 3$ ,

kategoria III – górna wartość graniczna:  $\theta_{i\max} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 4$ ,

dolna wartość graniczna:  $\theta_{i\min} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 4$ ,

gdzie:

$\theta_{i\min}, \theta_{i\max}$  – graniczne wartości operatywnej temperatury wewnętrznej [°C].

**Tabela 8.2.** Czas odpowiadający 3% i 5% odchyłce, wyznaczony na podstawie liczby godzin pracy i całkowitej liczby godzin, wg [237].

| 3% lub 5% czasu | Dziennie<br>[minuty] | Tygodniowo<br>[godziny] | Miesięcznie<br>[godziny] | Rocznie<br>[godziny] |
|-----------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| Godziny pracy   | 15 / 24              | 1 / 2                   | 5 / 9                    | 61 / 108             |
| Łącznie godziny | 43 / 72              | 5 / 9                   | 22 / 36                  | 259 / 432            |

## 8.2. Warunki w okresie letnim w wybranych wariantach mieszkań

Do oceny możliwości przegrzewania wybrano warianty obudowy balkonu z oszkleniem typu O 1.3 i O 2.1, czyli rozwiązaniami pozwalając uzyskać najmniejsze zapotrzebowanie na energię odpowiednio w sezonie chłodniczym i grzewczym. Przeprowadzone analizy nie są analizami pełnymi, ale dają pewną orientację na temat skali przegrzewania i możliwości jego eliminacji podczas zastosowania wariantów obudowy, które okazały się najbardziej pożądane z punktu widzenia potrzeb energetycznych.

### 8.2.1. Mieszkanie z otwartym balkonem

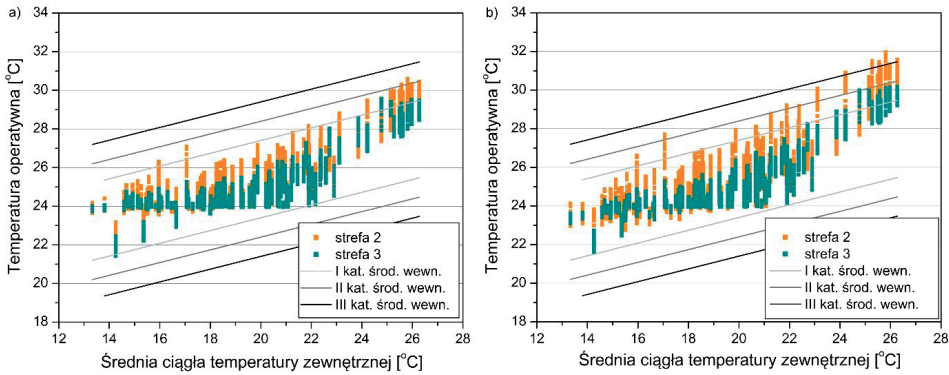
Mieszkanie w środkowej części budynku jest narażone na przegrzewanie w znacznie mniejszym stopniu niż mieszkanie skrajne na najwyższej kondygnacji, przy czym w obu wariantach nie ma możliwości zachowania warunków I kategorii środowiska wewnętrznego (tabela 8.3, 8.4). Pomieszczenie sąsiadujące z balkonem jest bardziej podatne na okresowe przegrzewanie, ze względu na większą powierzchnię oszkleń niż w pozostałych pomieszczeniach (okno i drzwi balkonowe), a wysokie temperatury utrzymują się tam najdłużej, poza sytuacją w której balkon skierowany jest na wschód. Warunki II kategorii w strefie 2 nie są przekroczone ponad dopuszczalne odchyłki dla orientacji wschodniej, południowo-wschodniej i południowej. W pozostałej części mieszkania warunki II kategorii środowiska wewnętrznego są zachowane niezależnie od umiejscowienia balkonu względem stron świata. W mieszkaniu na najwyższej kondygnacji wymagania III kategorii w strefie 2 zachowane są jeżeli balkon skierowany jest na wschód, południowy wschód lub południe, a w strefie 3 – niezależnie od orientacji.

**Tabela 8.3.** Liczba godzin poza kategoriami środowiska wewnętrznego, mieszkanie w części środkowej budynku z balkonem otwartym. Kolorem niebieskim zaznaczono warianty spełniające wymagania kategorii dla całego mieszkania (z dopuszczeniem 5% odchyłki).

| Orientacja balkonu | 2. strefa |         |          | 3. strefa |         |          |
|--------------------|-----------|---------|----------|-----------|---------|----------|
|                    | I kat.    | II kat. | III kat. | I kat.    | II kat. | III kat. |
| E                  | 113       | 0       | 0        | 180       | 22      | 0        |
| SE                 | 124       | 1       | 0        | 110       | 2       | 0        |
| S                  | 118       | 5       | 0        | 43        | 0       | 0        |
| SW                 | 190       | 64      | 1        | 87        | 0       | 0        |
| W                  | 222       | 66      | 3        | 145       | 9       | 0        |

**Tabela 8.4.** Liczba godzin poza kategoriami środowiska wewnętrznego, mieszkanie w części skrajnej budynku z balkonem otwartym. Kolorem niebieskim zaznaczono warianty spełniające wymagania kategorii dla całego mieszkania (z dopuszczeniem 5% odchyłki).

| Orientacja balkonu | 2. strefa |         |          | 3. strefa |         |          |
|--------------------|-----------|---------|----------|-----------|---------|----------|
|                    | I kat.    | II kat. | III kat. | I kat.    | II kat. | III kat. |
| E                  | 217       | 58      | 0        | 256       | 90      | 0        |
| SE                 | 272       | 105     | 4        | 213       | 37      | 0        |
| S                  | 279       | 115     | 21       | 161       | 1       | 0        |
| SW                 | 408       | 197     | 78       | 202       | 27      | 0        |
| W                  | 444       | 223     | 76       | 253       | 78      | 0        |



**Rys. 8.1.** Temperatura operatywna w pomieszczeniach 2 i 3 strefy, mieszkanie z balkonem otwartym skierowanym na południe: a) w środkowej części budynku, b) w skrajnej części budynku.

### 8.2.2. Mieszkanie z zabudowanym balkonem w części środkowej budynku, oszklenie na trzech ścianach obudowy

Różnice ilościowe pomiędzy wynikami dla obu rodzajów zabudowy balkonu są znaczne. Jeżeli zastosowano obudowę nieizolowaną z oszkleniem pojedynczym



z powłokami selektywnymi, warunki komfortu II i III kategorii środowiska wewnętrznego są spełnione zarówno w pokoju sąsiadującym z balkonem jak i w pozostałej części mieszkania. Przekroczenie warunków komfortu I kategorii ma miejsce w sierpniu, podczas fali upałów. Wysokie temperatury utrzymują się w strefie 2 krócej niż w pomieszczeniu z balkonem niezabudowanym, ze względu na niską przepuszczalność oszklelenia przestrzeni słonecznej.

Najgorsze warunki panują w strefie 2 jeżeli balkon skierowany jest na południowy zachód i zachód, co jest wynikiem największego napromieniowania obudowy (rys. 5.11). W strefie 3 warunki są najmniej korzystne jeżeli balkon skierowany jest na wschód lub zachód. Orientacja południowa pozwala na utrzymanie najniższych temperatur wewnętrznych w całym mieszkaniu, w tej sytuacji liczba godzin poza kategorią I w sierpniu nie przekracza 5% dopuszczalnej odchyłki nawet dla największej wysokości oszklelenia (tabela 8.5). Zastosowanie tego rodzaju obudowy umożliwia zmniejszenie liczby godzin poza kategoriami w porównaniu z mieszkaniem z balkonem otwartym, co wynika ze znacznego ograniczenia przepuszczalności promieniowania słonecznego przez oszklelenie ( $g = 0,3$ ) i zysków słonecznych w strefie 2.

**Tabela 8.5.** Liczba godzin poza kategoriami środowiska wewnętrznego. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklelenie typu O 1.3 na 3 ścianach obudowy balkonu. Kolorem niebieskim zaznaczono warianty spełniające wymagania kategorii dla całego mieszkania (z dopuszczeniem 5% odchyłki). Grubszą czcionką zaznaczono warianty, w których okresy przegrzewania są niedłuższe niż w mieszkaniu z balkonem otwartym.

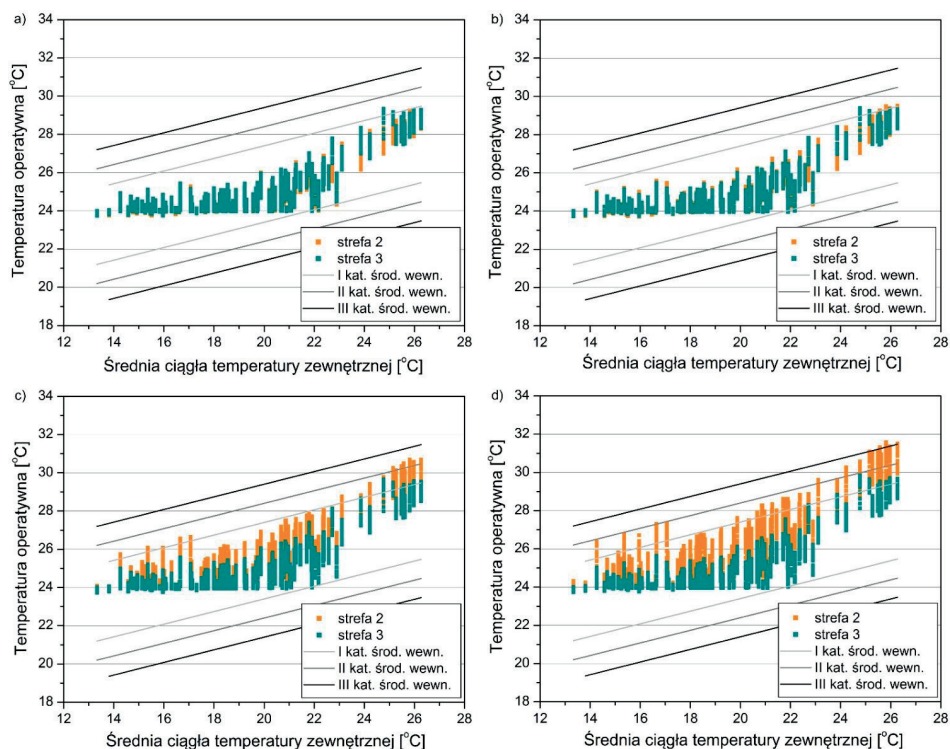
| Wysokość oszklelenia | Orientacja balkonu | 2. strefa |         |          | 3. strefa |         |          |
|----------------------|--------------------|-----------|---------|----------|-----------|---------|----------|
|                      |                    | I kat.    | II kat. | III kat. | I kat.    | II kat. | III kat. |
| 180                  | E                  | 5         | 0       | 0        | 157       | 14      | 0        |
|                      | SE                 | 0         | 0       | 0        | 80        | 0       | 0        |
|                      | S                  | 0         | 0       | 0        | 16        | 0       | 0        |
|                      | SW                 | 20        | 0       | 0        | 44        | 0       | 0        |
|                      | W                  | 38        | 0       | 0        | 99        | 0       | 0        |
| 220                  | E                  | 12        | 0       | 0        | 158       | 0       | 0        |
|                      | SE                 | 4         | 0       | 0        | 81        | 0       | 0        |
|                      | S                  | 4         | 0       | 0        | 20        | 0       | 0        |
|                      | SW                 | 39        | 0       | 0        | 48        | 0       | 0        |
|                      | W                  | 59        | 0       | 0        | 104       | 0       | 0        |
| 260                  | E                  | 21        | 0       | 0        | 162       | 15      | 0        |
|                      | SE                 | 11        | 0       | 0        | 86        | 0       | 0        |
|                      | S                  | 15        | 0       | 0        | 21        | 0       | 0        |
|                      | SW                 | 54        | 0       | 0        | 51        | 0       | 0        |
|                      | W                  | 73        | 0       | 0        | 108       | 2       | 0        |

Obudowa izolowana z oszkleniem podwójnym powoduje przegrzewanie pomieszczeń w zdecydowanie większym stopniu, a okresy dyskomfortu w pomieszczeniu sąsiadującym z balkonem są znacznie dłuższe niż w pozostałej części mieszkania. Podobnie jak w pierwszym wariancie, najgorsze warunki w strefie 2 panują jeżeli balkon skierowany jest na zachód i południowy zachód, a w strefie 3 – na wschód i zachód. Najbardziej korzystne dla strefy 2 są kierunki wschodni i południowo-wschodni, a dla strefy 3 – południowy. W tej wersji zabudowy nie ma możliwości spełnienia wymagań I kategorii środowiska. Dla orientacji południowo-wschodniej i południowej przy najmniejszej wysokości oszklenia możliwe jest warunkowe zachowanie w sierpniu wymagań II kategorii. Orientacje poza południowo-zachodnią i zachodnią pozwalają uzyskać warunki wewnętrzne w granicach III kategorii w całym mieszkaniu, nawet jeżeli zastosowano największe wymiary oszklenia (tabela 8.6, rys. 8.2).

Porównując warunki panujące w mieszkaniach z balkonem otwartym i zabudowanym można stwierdzić, że rodzaj zabudowy balkonu ma duży wpływ na temperaturę w strefie 2. Oszklenie typu O 1.3 będzie tam zmniejszać, a oszklenie typu O 2.1 zwiększać intensywność przegrzewania. Podobne tendencje można zaobserwować w strefie 3, z tym że różnice ilościowe nie są aż tak duże (tabele 8.5 – 8.12).

**Tabela 8.6.** Liczba godzin poza kategoriami środowiska wewnętrznego. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie typu O 2.1 na 3 ścianach obudowy balkonu. Kolorem niebieskim zaznaczono warianty spełniające wymagania kategorii dla całego mieszkania (z dopuszczeniem 5% odchyłki). Grubszą czcionką zaznaczono warianty, w których okresy przegrzewania są niedłuższe niż w mieszkaniu z balkonem otwartym.

| Wysokość oszklenia | Orientacja balkonu | 2. strefa |         |          | 3. strefa |          |          |
|--------------------|--------------------|-----------|---------|----------|-----------|----------|----------|
|                    |                    | I kat.    | II kat. | III kat. | I kat.    | II kat.  | III kat. |
| 180                | E                  | 197       | 14      | <b>0</b> | 191       | 35       | <b>0</b> |
|                    | SE                 | 197       | 15      | <b>0</b> | 123       | <b>4</b> | <b>0</b> |
|                    | S                  | 215       | 30      | <b>0</b> | 52        | <b>0</b> | <b>0</b> |
|                    | SW                 | 313       | 93      | <b>0</b> | 94        | <b>0</b> | <b>0</b> |
|                    | W                  | 335       | 96      | <b>2</b> | 152       | 10       | <b>0</b> |
| 220                | E                  | 263       | 60      | <b>0</b> | 199       | 42       | <b>0</b> |
|                    | SE                 | 266       | 71      | <b>0</b> | 131       | 8        | <b>0</b> |
|                    | S                  | 306       | 92      | <b>0</b> | 77        | <b>0</b> | <b>0</b> |
|                    | SW                 | 441       | 146     | 23       | 112       | 4        | <b>0</b> |
|                    | W                  | 451       | 157     | 21       | 162       | 15       | <b>0</b> |
| 260                | E                  | 316       | 93      | <b>0</b> | 204       | 50       | <b>0</b> |
|                    | SE                 | 380       | 116     | <b>0</b> | 142       | 10       | <b>0</b> |
|                    | S                  | 425       | 135     | 10       | 87        | <b>0</b> | <b>0</b> |
|                    | SW                 | 545       | 215     | 58       | 122       | 5        | <b>0</b> |
|                    | W                  | 559       | 215     | 57       | 174       | 17       | <b>0</b> |



**Rys. 8.2.** Temperatura operatywna w pomieszczeniach 2 i 3 strefy. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, balkon skierowany na południe. Oszklenie typu O 1.3: a) wysokość oszklenia 1,80 m, b) wysokość oszklenia 2,60 m. Oszklenie typu O 2.1: c) wysokość oszklenia 1,80 m, d) wysokość oszklenia 2,60 m.

### 8.2.3. Mieszkanie z zabudowanym balkonem w części środkowej budynku, oszklenie na jednej ścianie obudowy balkonu

Zastosowanie oszklenia na jednej ścianie obudowy balkonu pozwala w większości wariantów ograniczyć przegrzewanie w przyległym pomieszczeniu, z tym że efekty te są większe dla obudowy izolowanej z oszkleniem O 2.1. Wyjątek stanowi balkon skierowany na zachód, gdzie w tej wersji obudowy zaobserwowano wydłużenie okresu wysokiej temperatury. W pozostałej części mieszkania usunięcie oszklenia ze ścian bocznych obudowy balkonu również daje korzystne efekty.

Oszklenie typu O 1.3. daje umożliwia spełnienie wymagań II i III kategorii środowiska wewnętrznego niezależnie od orientacji balkonu i wysokości oszklenia, a także wymagań kategorii I pod warunkiem skierowania balkonu na południe (z dopuszczeniem odchyłki). W drugim wariantcie obudowy utrzymanie warunków komfortu II i III kategorii może wymagać ograniczenia wysokości oszklenia

lub projektowania budynku w taki sposób, aby balkon skierowany był na wschód, południowy wschód lub południe (tabela 8.7, 8.8, rys. 8.3). Porównanie z wersją mieszkania z otwartym balkonem wypada podobnie jak dla obudowy oszklonej na wszystkich ścianach (p. 8.2.2), czyli oszklenie typu O 1.3 zmniejsza, a oszklenie typu O 2.1 zwiększa intensywność przegrzewania.

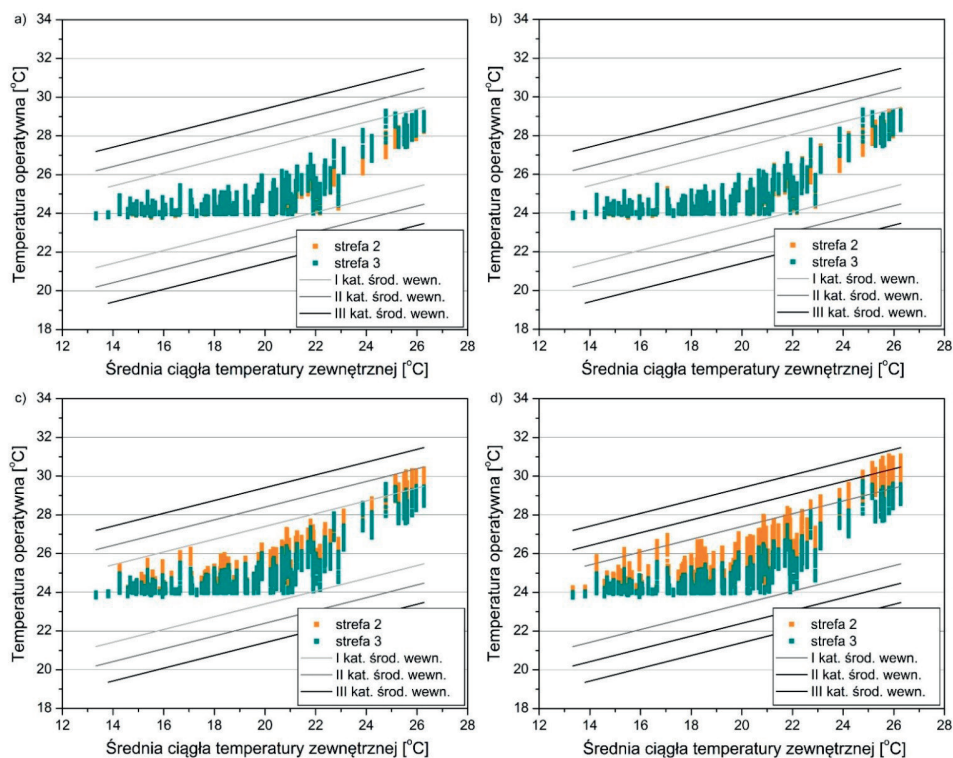
**Tabela 8.7.** Liczba godzin poza kategoriami środowiska wewnętrznego. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie typu O 1.3 na 1 ścianie obudowy balkonu. Kolorem niebieskim zaznaczono warianty spełniające wymagania kategorii dla całego mieszkania (z dopuszczeniem 5% odchyłki). Grubszą czcionką zaznaczono warianty, w których okresy przegrzewania są niedłuższe niż w mieszkaniu z balkonem otwartym.

| Wysokość oszklenia | Orientacja balkonu | 2. strefa |          |          | 3. strefa  |           |          |
|--------------------|--------------------|-----------|----------|----------|------------|-----------|----------|
|                    |                    | I kat.    | II kat.  | III kat. | I kat.     | II kat.   | III kat. |
| 180                | E                  | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>152</b> | <b>14</b> | <b>0</b> |
|                    | SE                 | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>79</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | S                  | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>15</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | SW                 | <b>14</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>43</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | W                  | <b>29</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>99</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> |
| 220                | E                  | <b>1</b>  | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>151</b> | <b>14</b> | <b>0</b> |
|                    | SE                 | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>80</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | S                  | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>16</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | SW                 | <b>30</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>44</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | W                  | <b>48</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>101</b> | <b>0</b>  | <b>0</b> |
| 260                | E                  | <b>4</b>  | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>160</b> | <b>14</b> | <b>0</b> |
|                    | SE                 | <b>1</b>  | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>82</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | S                  | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>18</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | SW                 | <b>46</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>50</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | W                  | <b>65</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>108</b> | <b>2</b>  | <b>0</b> |

**Tabela 8.8.** Liczba godzin poza kategoriami środowiska wewnętrznego. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie typu O 2.1 na 1 ścianie obudowy balkonu. Kolorem niebieskim zaznaczono warianty spełniające wymagania kategorii dla całego mieszkania (z dopuszczeniem 5% odchyłki). Grubszą czcionką zaznaczono warianty, w których okresy przegrzewania są niedłuższe niż w mieszkaniu z balkonem otwartym.

| Wysokość oszklenia | Orientacja balkonu | 2. strefa |          |          | 3. strefa |          |          |
|--------------------|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    |                    | I kat.    | II kat.  | III kat. | I kat.    | II kat.  | III kat. |
| 180                | E                  | 141       | <b>0</b> | <b>0</b> | 183       | 28       | <b>0</b> |
|                    | SE                 | 153       | <b>0</b> | <b>0</b> | 119       | 2        | <b>0</b> |
|                    | S                  | 145       | <b>2</b> | <b>0</b> | 40        | <b>0</b> | <b>0</b> |
|                    | SW                 | 289       | 81       | <b>0</b> | 92        | 0        | <b>0</b> |
|                    | W                  | 356       | 112      | <b>2</b> | 151       | 11       | <b>0</b> |

| Wysokość<br>oszklenia | Orientacja<br>balkonu | 2. strefa |         |          | 3. strefa |         |          |
|-----------------------|-----------------------|-----------|---------|----------|-----------|---------|----------|
|                       |                       | I kat.    | II kat. | III kat. | I kat.    | II kat. | III kat. |
| 220                   | E                     | 196       | 7       | 0        | 188       | 34      | 0        |
|                       | SE                    | 232       | 35      | 0        | 125       | 7       | 0        |
|                       | S                     | 234       | 44      | 0        | 55        | 0       | 0        |
|                       | SW                    | 382       | 141     | 17       | 104       | 4       | 0        |
|                       | W                     | 479       | 196     | 31       | 165       | 15      | 0        |
| 260                   | E                     | 250       | 43      | 0        | 195       | 40      | 0        |
|                       | SE                    | 297       | 71      | 0        | 129       | 8       | 0        |
|                       | S                     | 308       | 83      | 0        | 75        | 0       | 0        |
|                       | SW                    | 484       | 211     | 56       | 121       | 5       | 0        |
|                       | W                     | 605       | 258     | 69       | 176       | 18      | 0        |



**Rys. 8.3.** Temperatura operatywna w pomieszczeniach 2 i 3 strefy. Mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, balkon skierowany na południe. Oszklenie typu O 1.3: a) wysokość oszklenia 1,80 m, b) wysokość oszklenia 2,60 m. Oszklenie typu O 2.1: c) wysokość oszklenia 1,80 m, d) wysokość oszklenia 2,60 m.

#### 8.2.4. Mieszkanie z zabudowanym balkonem w skrajnej części budynku, oszklenie na trzech ścianach obudowy balkonu

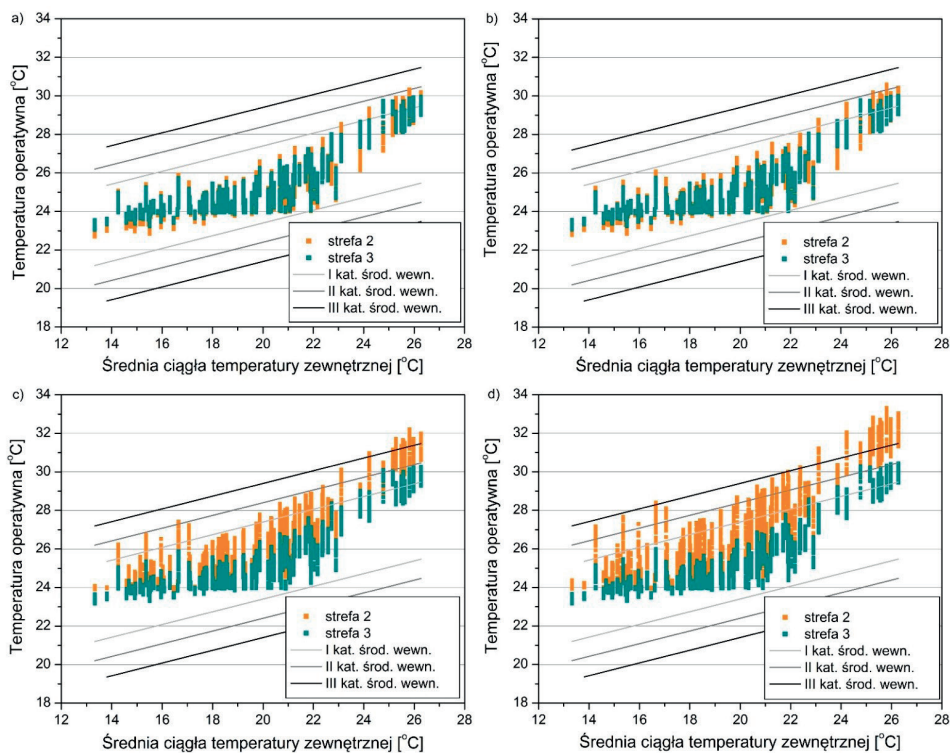
W mieszkaniu zlokalizowanym w skrajnej części budynku przegrzewanie jest odczuwalne znacznie bardziej niż w segmencie środkowym. Mimo tego, zastosowanie oszklenia typu O 1.3. pozwala spełnić wymagania III kategorii komfortu niezależnie do orientacji i wysokości oszklenia, a w wybranych wariantach także wymagania kategorii II (orientacja południowa i południowo-wschodnia – wszystkie wysokości oszklei, orientacja południowo-zachodnia – wysokość 1,80 m). To rozwiązanie, podobnie jak w mieszkaniu w części środkowej budynku, skraca okres podwyższonej temperatury z jakim mamy do czynienia w mieszkaniu z balkonem otwartym (tabela 8.9).

Obudowa izolowana z oszkleniem typu O 2.1. powoduje, że liczba godzin o temperaturze przekraczającej granice poszczególnych kategorii w pomieszczeniu sąsiadującym z balkonem rośnie ponad dwukrotnie (tabela 8.10). Ma to pośredni wpływ także na większy dyskomfort w pozostałej części mieszkania, chociaż strefa ta spełnia w każdej sytuacji wymagania kategorii III. Strefę 2 można zaliczyć do kategorii III jedynie dla orientacji balkonu wschodniej lub południowo-wschodniej, i wysokości oszklenia wynoszącej 1,80 m. Zastosowanie oszklenia o wysokiej przepuszczalności promieniowania ( $g = 0,74$ ) w połączeniu z izolowaną obudową zdecydowanie pogarsza komfort termiczny w porównaniu z mieszkaniem z balkonem otwartym. Jedynie w strefie 3 panujące warunki nie są znacząco gorsze niż w wersji bazowej (rys. 8.4).

**Tabela 8.9.** Liczba godzin poza kategoriami środowiska wewnętrznego. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie typu O 1.3 na 3 ścianach obudowy balkonu. Kolorem niebieskim zaznaczono warianty spełniające wymagania kategorii dla całego mieszkania (z dopuszczeniem 5% odchyłki). Grubszą czcionką zaznaczono warianty, w których okresy przegrzewania są niedłuższe niż w mieszkaniu z balkonem otwartym.

| Wysokość oszklenia | Orientacja balkonu | 2. strefa  |           |          | 3. strefa  |           |          |
|--------------------|--------------------|------------|-----------|----------|------------|-----------|----------|
|                    |                    | I kat.     | II kat.   | III kat. | I kat.     | II kat.   | III kat. |
| 180                | E                  | <b>99</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>249</b> | <b>67</b> | <b>0</b> |
|                    | SE                 | <b>104</b> | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>179</b> | <b>10</b> | <b>0</b> |
|                    | S                  | <b>120</b> | <b>3</b>  | <b>0</b> | <b>111</b> | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | SW                 | <b>163</b> | <b>18</b> | <b>0</b> | <b>159</b> | <b>3</b>  | <b>0</b> |
|                    | W                  | <b>191</b> | <b>30</b> | <b>0</b> | <b>215</b> | <b>33</b> | <b>0</b> |
| 220                | E                  | <b>116</b> | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>247</b> | <b>67</b> | <b>0</b> |
|                    | SE                 | <b>124</b> | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>182</b> | <b>10</b> | <b>0</b> |
|                    | S                  | <b>136</b> | <b>7</b>  | <b>0</b> | <b>116</b> | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | SW                 | <b>196</b> | <b>40</b> | <b>0</b> | <b>166</b> | <b>3</b>  | <b>0</b> |
|                    | W                  | <b>213</b> | <b>47</b> | <b>0</b> | <b>221</b> | <b>36</b> | <b>0</b> |

| Wysokość<br>oszklenia | Orientacja<br>balkonu | 2. strefa |         |          | 3. strefa |         |          |
|-----------------------|-----------------------|-----------|---------|----------|-----------|---------|----------|
|                       |                       | I kat.    | II kat. | III kat. | I kat.    | II kat. | III kat. |
| 260                   | E                     | 130       | 1       | 0        | 253       | 74      | 0        |
|                       | SE                    | 137       | 3       | 0        | 185       | 13      | 0        |
|                       | S                     | 148       | 11      | 0        | 127       | 0       | 0        |
|                       | SW                    | 216       | 53      | 0        | 167       | 4       | 0        |
|                       | W                     | 236       | 61      | 0        | 223       | 41      | 0        |



**Rys. 8.4.** Temperatura operatywna w pomieszczeniach 2 i 3 strefy. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, balkon skierowany na południe. Oszklenie typu O 1.3: a) wysokość oszklenia 1,80 m, b) wysokość oszklenia 2,60 m. Oszklenie typu O 2.1: c) wysokość oszklenia 1,80 m, d) wysokość oszklenia 2,60 m.



**Tabela 8.10.** Liczba godzin poza kategoriami środowiska wewnętrznego. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie typu O 2.1 na 3 ścianach obudowy balkonu. Kolorem niebieskim zaznaczono warianty spełniające wymagania kategorii dla całego mieszkania (z dopuszczeniem 5% odchyłki). Grubszą czcionką zaznaczono warianty, w których okresy przegrzewania są nie dłuższe niż w mieszkaniu z balkonem otwartym.

| Wysokość oszklenia | Orientacja balkonu | 2. strefa |         |          | 3. strefa |         |          |
|--------------------|--------------------|-----------|---------|----------|-----------|---------|----------|
|                    |                    | I kat.    | II kat. | III kat. | I kat.    | II kat. | III kat. |
| 180                | E                  | 384       | 156     | 8        | 280       | 111     | <b>0</b> |
|                    | SE                 | 419       | 173     | 21       | 226       | 50      | <b>0</b> |
|                    | S                  | 472       | 211     | 67       | 181       | 6       | <b>0</b> |
|                    | SW                 | 599       | 315     | 127      | 212       | 43      | <b>0</b> |
|                    | W                  | 622       | 321     | 122      | 258       | 84      | <b>0</b> |
| 220                | E                  | 482       | 212     | 46       | 295       | 119     | 2        |
|                    | SE                 | 517       | 247     | 86       | 235       | 63      | <b>0</b> |
|                    | S                  | 603       | 316     | 128      | 193       | 9       | <b>0</b> |
|                    | SW                 | 792       | 432     | 201      | 227       | 59      | <b>0</b> |
|                    | W                  | 792       | 429     | 201      | 270       | 98      | <b>0</b> |
| 260                | E                  | 543       | 280     | 91       | 300       | 126     | 3        |
|                    | SE                 | 657       | 348     | 135      | 247       | 70      | <b>0</b> |
|                    | S                  | 774       | 425     | 182      | 209       | 19      | <b>0</b> |
|                    | SW                 | 987       | 557     | 288      | 238       | 69      | <b>0</b> |
|                    | W                  | 989       | 553     | 274      | 285       | 109     | <b>0</b> |

#### 8.2.5. Mieszkanie z zabudowanym balkonem w skrajnej części budynku, oszklenie na jednej ścianie obudowy balkonu

Tak jak to miało miejsce w mieszkaniu w części środkowej budynku, usunięcie oszkleń ze ścian bocznych balkonu zmniejsza w pewnym stopniu dyskomfort związany z przegrzewaniem strefy mieszkalnej (tabela 8.11, 8.12, rys. 8.5). Jedynie dla kierunku zachodniego liczba godzin powyżej wielkości granicznych jest większa, jeżeli oszklenie umieszczone jest na ścianie frontowej obudowy, a podobne zależności występują także w mieszkaniu w części środkowej budynku.

Możliwości spełnienia wymagań poszczególnych kategorii środowiska wewnętrznego przy zastosowaniu obudowy nieizolowanej są takie, jak w poprzednio opisywanym przypadku – pomieszczenie kwalifikuje się do II kategorii niezależnie od wysokości oszklenia dla orientacji balkonu południowej i południowo-wschodniej, oraz południowo-zachodniej pod warunkiem ograniczenia wysokości oszklenia do 2,20 m. Ograniczenia kategorii III nie są przekroczone niezależnie od orientacji mieszkania i wysokości przegród przezroczystych.

Zredukowanie powierzchni oszklenia w obudowie izolowanej zwiększa szanse utrzymania warunków III kategorii także dla większych wysokości szyb, pod warunkiem że balkon skierowany będzie na wschód lub południowy wschód.

Porównanie z wersją mieszkania z otwartym balkonem dla tego rodzaju obudowy wypada mniej korzystnie (podobnie jak dla obudowy oszklonej na wszystkich ścianach – p. 8.2.4), z tym że dla oszklenia typu O 2.1 o najmniejszej wysokości i kierunku wschodniego, południowo-wschodniego oraz południowego liczba godzin poza kategorią III nieco zmalała.

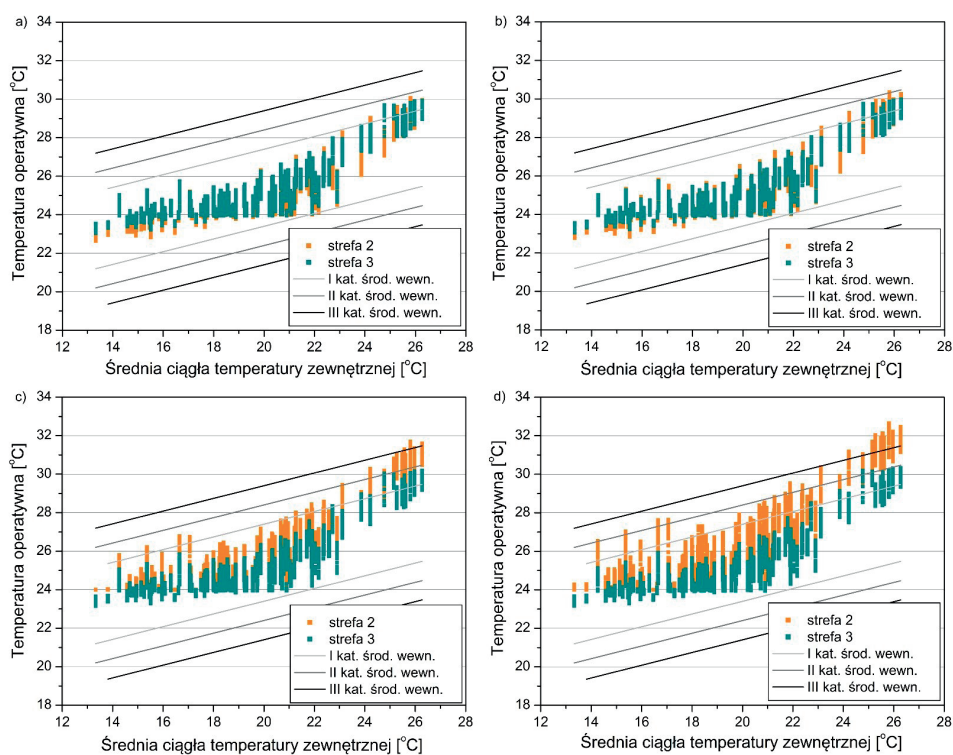
**Tabela 8.11.** Liczba godzin poza kategoriami środowiska wewnętrznego. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie typu O 1.3 na 1 ścianie obudowy balkonu. Kolorem niebieskim zaznaczono warianty spełniające wymagania kategorii dla całego mieszkania (z dopuszczeniem 5% odchyłki). Grubszą czcionką zaznaczono warianty, w których okresy przegrzewania są niedłuższe niż w mieszkaniu z balkonem otwartym.

| Wysokość oszklenia | Orientacja balkonu | 2. strefa  |           |          | 3. strefa  |           |          |
|--------------------|--------------------|------------|-----------|----------|------------|-----------|----------|
|                    |                    | I kat.     | II kat.   | III kat. | I kat.     | II kat.   | III kat. |
| 180                | E                  | <b>67</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>240</b> | <b>66</b> | <b>0</b> |
|                    | SE                 | <b>72</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>176</b> | <b>5</b>  | <b>0</b> |
|                    | S                  | <b>82</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>105</b> | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | SW                 | <b>143</b> | <b>7</b>  | <b>0</b> | <b>155</b> | <b>3</b>  | <b>0</b> |
|                    | W                  | <b>172</b> | <b>19</b> | <b>0</b> | <b>211</b> | <b>32</b> | <b>0</b> |
| 220                | E                  | <b>81</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>243</b> | <b>62</b> | <b>0</b> |
|                    | SE                 | <b>93</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>179</b> | <b>5</b>  | <b>0</b> |
|                    | S                  | <b>105</b> | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>106</b> | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | SW                 | <b>176</b> | <b>21</b> | <b>0</b> | <b>158</b> | <b>3</b>  | <b>0</b> |
|                    | W                  | <b>204</b> | <b>40</b> | <b>0</b> | <b>216</b> | <b>34</b> | <b>0</b> |
| 260                | E                  | <b>95</b>  | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>248</b> | <b>67</b> | <b>0</b> |
|                    | SE                 | <b>112</b> | <b>0</b>  | <b>0</b> | <b>179</b> | <b>10</b> | <b>0</b> |
|                    | S                  | <b>127</b> | <b>4</b>  | <b>0</b> | <b>111</b> | <b>0</b>  | <b>0</b> |
|                    | SW                 | <b>198</b> | <b>46</b> | <b>0</b> | <b>165</b> | <b>4</b>  | <b>0</b> |
|                    | W                  | <b>231</b> | <b>56</b> | <b>0</b> | <b>221</b> | <b>39</b> | <b>0</b> |

**Tabela 8.12.** Liczba godzin poza kategoriami środowiska wewnętrznego. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie typu O 2.1 na 1 ścianie obudowy balkonu. Kolorem niebieskim zaznaczono warianty spełniające wymagania kategorii dla całego mieszkania (z dopuszczeniem 5% odchyłki). Grubszą czcionką zaznaczono warianty, w których okresy przegrzewania są niedłuższe niż w mieszkaniu z balkonem otwartym.

| Wysokość oszklenia | Orientacja balkonu | 2. strefa |         |           | 3. strefa |         |          |
|--------------------|--------------------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|----------|
|                    |                    | I kat.    | II kat. | III kat.  | I kat.    | II kat. | III kat. |
| 180                | E                  | 299       | 98      | <b>0</b>  | 269       | 93      | <b>0</b> |
|                    | SE                 | 350       | 133     | <b>3</b>  | 215       | 39      | <b>0</b> |
|                    | S                  | 342       | 164     | <b>16</b> | 165       | 4       | <b>0</b> |
|                    | SW                 | 520       | 282     | 115       | 208       | 36      | <b>0</b> |
|                    | W                  | 676       | 335     | 145       | 258       | 85      | <b>0</b> |

|     |    |      |     |     |     |     |   |
|-----|----|------|-----|-----|-----|-----|---|
| 220 | E  | 360  | 144 | 4   | 278 | 105 | 1 |
|     | SE | 425  | 192 | 23  | 224 | 52  | 0 |
|     | S  | 453  | 220 | 67  | 178 | 6   | 0 |
|     | SW | 698  | 359 | 189 | 219 | 56  | 0 |
|     | W  | 851  | 430 | 231 | 274 | 98  | 0 |
| 260 | E  | 434  | 196 | 24  | 286 | 115 | 2 |
|     | SE | 534  | 264 | 86  | 235 | 62  | 0 |
|     | S  | 562  | 290 | 121 | 188 | 9   | 0 |
|     | SW | 902  | 468 | 266 | 234 | 68  | 0 |
|     | W  | 1071 | 602 | 323 | 291 | 114 | 0 |



**Rys. 8.5.** Temperatura operatywna w pomieszczeniach 2 i 3 strefy. Mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, balkon skierowany na południe. Oszklenie typu O 1.3: a) wysokość oszklenia 1,80 m, b) wysokość oszklenia 2,60 m. Oszklenie typu O 2.1: c) wysokość oszklenia 1,80 m, d) wysokość oszklenia 2,60 m.

## 9. Monitoring mieszkań z zabudowanymi balkonami

Poza symulacjami komputerowymi prowadzono też badania doświadczalne nad systemami szklarniowymi funkcjonującymi w rzeczywistych warunkach klimatycznych. Miały one na celu sprawdzenie, jakie warunki panują w przestrzeni słonecznej i przyległych pomieszczeniach mieszkalnych, w wybranych miesiącach sezonu grzewczego i okresu letniego. Od lipca 2017 do września 2018 roku monitorowano temperatury w mieszkaniach z zabudowanymi balkonami, zlokalizowanych w Zamościu i Lublinie w budynkach wielorodzinnych o różnej konstrukcji. Wszystkie balkony obudowane zostały indywidualnie przez mieszkańców, przede wszystkim ze względów użytkowych i bezpieczeństwa – celem było uzyskanie dodatkowej powierzchni, zabezpieczenie przed włamaniem oraz przed obecnością ptaków.

### 9.1. Zakres badań

W trakcie badań rejestrowano temperaturę na balkonach i w pomieszczeniach mieszkalnych w odstępach 30. minutowych, przy pomocy rejestratorów pastylkowych typu iButton DS1922L o zwiększonej pamięci (rys. 9.1). Do odczytu danych służył interfejs MP00206 podłączany do komputera kablem USB.

Rejestratory charakteryzowały się następującymi parametrami:

- zakres pomiaru: od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+85^{\circ}\text{C}$
- dokładność pomiaru:  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  w zakresie od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $+65^{\circ}\text{C}$
- rozdzielczość pomiarów:  $0,5^{\circ}\text{C}$  lub  $0,0625^{\circ}\text{C}$  (8 lub 16 bitów)
- pojemność pamięci: 8192 pomiarów dla odczytów 8. bitowych lub 4096 pomiarów dla odczytów 16. bitowych
- interwał odczytów: od 1 sekundy do 273 godzin.



Rys. 9.1. Rejestratory pastylkowe typu iButton.

Tabela 9.1. Mieszkania w których prowadzony był monitoring temperatury – podstawowe dane.

| Lp. | Lokalizacja                               | Pow. mieszkania i balkonu [m <sup>2</sup> ] | Okres monitoringu         | Liczba mieszkańców                                                                          | Średnie zyski bytowe [W/m <sup>2</sup> ] | Zabudowa balkonu                  | Orientacja balkonu | Liczba i lokalizacja* rejestratorów |
|-----|-------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1.  | Zamość, ul. Wyszyńskiego, 11. kondygnacja | 62,34<br>6,36                               | 3 VII 2017 – 27 III 2018  | 5<br>(2 osoby pracujące, 1 na emeryturze, 2 studiujące okresowo poza miejscem zamieszkania) | 7,0                                      | Bezramowa szyby zwykle pojedyncze | Południowy wschód  | 5<br>B + K + 3xP                    |
| 2.  | Zamość, ul. Wyszyńskiego, 11. kondygnacja | 35,38<br>6,36                               | 3 III 2017 – 27 III 2018  | 1 (osoba pracująca)                                                                         | 5,6                                      | Bezramowa szyby zwykle pojedyncze | Południowy wschód  | 3<br>B + K + P                      |
| 3.  | Lublin, ul. Baśniowa, 2. kondygnacja      | 55,60<br>5,01                               | 13 VII 2017 – 11 III 2018 | 1 (osoba pracująca)                                                                         | 3,1                                      | Bezramowa szyby zwykle pojedyncze | Północny zachód    | 3<br>B + 2xP                        |
| 4.  | Lublin, ul. Szmaragdowa, 1. kondygnacja   | 62,50<br>4,20                               | 2 I 2018 – 25 IX 2018     | 3 (1 osoba pracująca, 2 młodzież szkolna)                                                   | 6,8                                      | Ramowa szyby podwójne             | Wschód             | 2<br>B + P                          |
| 5.  | Lublin, ul. Okrzei, 11. kondygnacja       | 36,70<br>1,76                               | 4 I 2018 – 26 IX 2018     | 2 (osoba pracująca)                                                                         | 7,0                                      | Ramowa szyby podwójne             | Zachód             | 3<br>B + K + P                      |

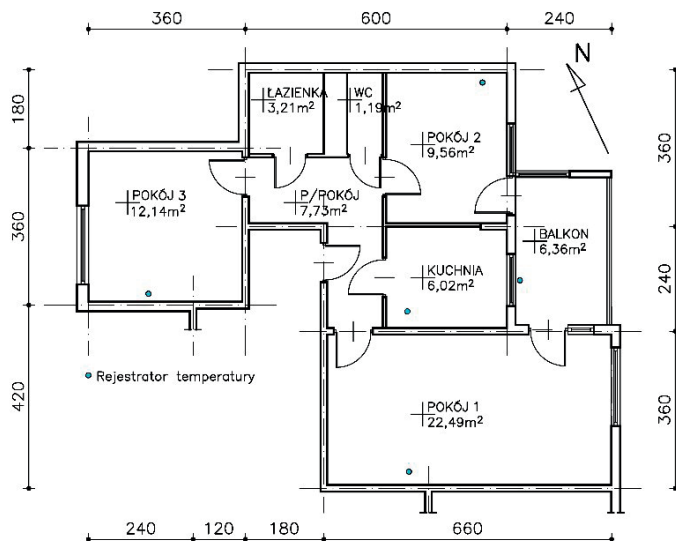
\* B – balkon, K – kuchnia, P – pokój

Pierwsze badania (od 3 VII 2017 do 27 III 2018) prowadzono na terenie spółdzielni mieszkaniowej im. J. Zamoyskiego w Zamościu, w 11. kondygnacyjnych

budynkach o konstrukcji prefabrykowanej zlokalizowanych przy ulicy Wyszyńskiego (mieszkania nr 1 i 2). Budynki powstały w technologii Wk-70 z prefabrykatów żelbetowych warstwowych, izolowanych styropianem o grubości 12 cm. Układ konstrukcyjny budynków był poprzeczny, wysokość kondygnacji brutto wynosiła 2,80 m. Ściany zewnętrzne ocieplono dodatkowo styropianem grafitowym o grubości 10 cm w systemie ETICS (mieszkanie nr 1, rys. 9.2, 9.3) i wełną mineralną o grubości 8 cm montowaną na ruszcie drewnianym i osłoniętą blachą trapezową (mieszkanie nr 2, rys. 9.4, 9.5). Orientacyjne współczynniki przenikania przegród zewnętrznych po termomodernizacji wyniosły odpowiednio 0,19 W/(m<sup>2</sup>·K) i 0,21 W/(m<sup>2</sup>·K). Stropodachy wentylowane w obu budynkach ocieplono granulem wełnianym o grubości 18 – 20 cm.



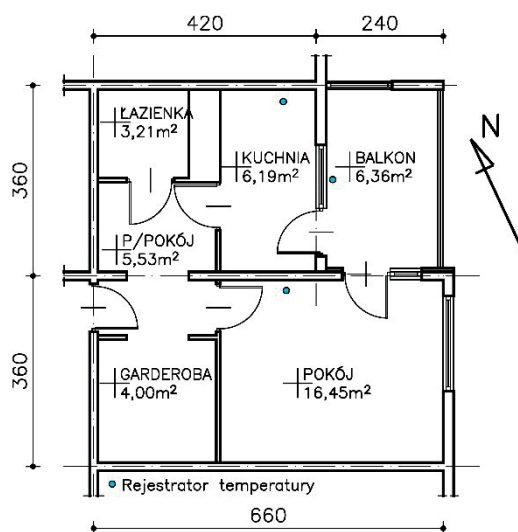
Rys. 9.2. Zabudowany balkon, mieszkanie nr 1, Zamość.



Rys. 9.3. Plan mieszkania i rozmieszczenie rejestratorów temperatury, mieszkanie nr 1, Zamość.



Rys. 9.4. Zabudowany balkon, mieszkanie nr 2, Zamość.



Rys. 9.5. Plan mieszkania i rozmieszczenie rejestratorów temperatury, mieszkanie nr 2, Zamość.

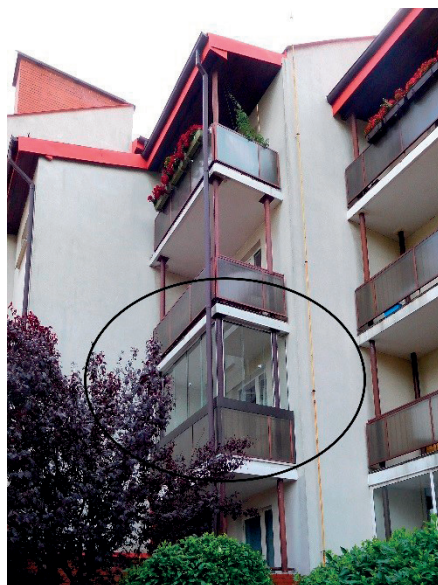


Zabudowa balkonów realizowana była na podstawie projektu wykonanego na zlecenie spółdzielni mieszkaniowej w 2011 roku. W zabudowie wykorzystano bezramowy system zabudowy, bez pionowych ram między szybami. Profile poziome wykonano z aluminium lakierowanego proszkowo, umożliwiając one przesuwanie szyb oraz otwieranie ich pod kątem 90°. Panele szklane są ze szkła hartowanego o grubości 10 mm, bez powłok spektralnie selektywnych. W profilach prowadzących i pomiędzy szybami zainstalowano uszczelki silikonowe (rys 9.6). W dolnej części zabudowy do istniejącej barierki przymocowano komorową płytę poliwęglanową o grubości 6 mm. Boczna ściana balkonu obudowano izolowaną płytą warstwową grubości 12 cm do wysokości 1,10 m, i ocieplono styropianem o grubości 4 cm. Powyżej zaprojektowano okno jednoskrzydłowe o wymiarach zewnętrznych 1,24 x 1,50 m. Balkony w obu mieszkaniach skierowane są na południowy wschód i zlokalizowane na 11. kondygnacji.

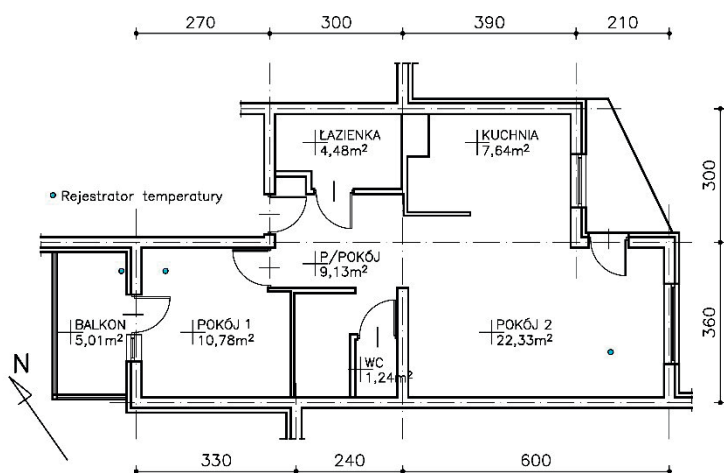


**Rys. 9.6.** Uszczelki międzyszybowe w obudowie balkonu, mieszkanie nr 1, Zamość.

W podobnym okresie (od 13 VII 2017 do 11 III 2018) rejestrowano temperaturę w mieszkaniu nr 3, położonym przy ulicy ul. Baśniowej w Lublinie, na 2. kondygnacji. Budynek ten był szeregowy, złożony z 6 segmentów, 5. kondygnacyjny o wysokości kondygnacji brutto równej 2,90 m (rys. 9.7, 9.8). Ostatnią kondygnację stanowiło poddasze mieszkalne z dachem dwuspadowym. Układ konstrukcyjny był poprzeczny, ściany nośne i stropy budynku wykonano z płyt kanałowych typu „Żerań”, a ściany osłonowe – z betonu komórkowego o grubości 24 cm. Ściany zewnętrzne ocieplono styropianem o grubości 10 cm, w systemie ETICS. Orientacyjny współczynnik przenikania ciepła wynosił 0,35 W/(m<sup>2</sup>·K) i 0,26 W/(m<sup>2</sup>·K), odpowiednio dla ścian nośnych i osłonowych.



Rys. 9.7. Zabudowany balkon, mieszkanie nr 3, Lublin.



Rys. 9.8. Plan mieszkania i rozmieszczenie rejestratorów temperatury, mieszkanie nr 3, Lublin.

Zabudowa balkonów wykonana została tam również w systemie bezramowym, ze szkła hartowanego zwykłego o grubości 10 mm, osadzonego w aluminiowych prowadnicach poziomych. Luzy między skrzydłami wynosiły ok. 17 mm, poniżej barierki zamontowano komorową płytę poliwęglanową (rys. 9.9). Balkon skierowany jest na północny zachód.

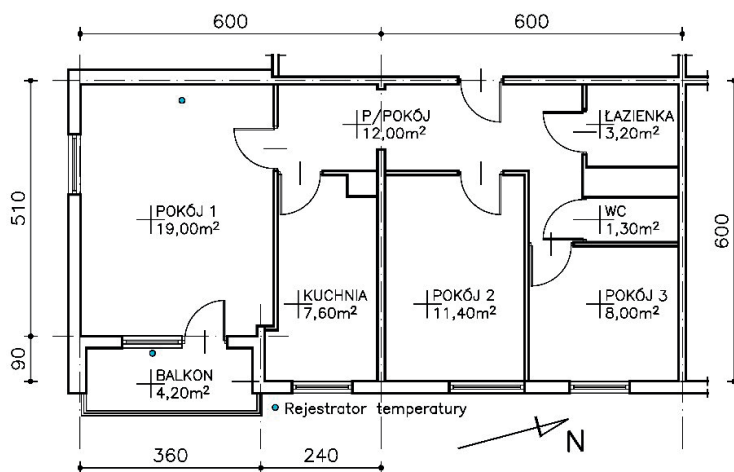


**Rys. 9.9.** *Luzy międzyszybowe w obudowie balkonu, mieszkanie nr 3, Lublin.*

Na początku 2018 roku do badań dołączono kolejne dwa mieszkania w Lublinie, mieszczące się w budynkach przy ulicy Szmaragdowej (mieszkanie nr 4, na pierwszej kondygnacji) i Okrzei (mieszkanie nr 5, na 11. kondygnacji). Oba budynki wykonane były w technologii prefabrykowanej. Budynek przy ulicy Szmaragdowej to budynek punktowy, 12. kondygnacyjny, całkowicie podpiwniczony, ze stropodachem dwudzielnym wentylowanym. Konstrukcja nośna wykonana została w technologii W-70, a ściany osłonowe o grubości 37 cm wymurowano z betonu komórkowego klasy 6. Układ konstrukcyjny był mieszany, poprzeczno-podłużny, wysokość kondygnacji brutto wynosiła 2,80 m. Ściany zewnętrzne docieplono metodą ETICS z zastosowaniem styropianu i wełny mineralnej fasadowej o grubości 10 cm. Orientacyjny współczynnik przenikania ciepła po termomodernizacji wynosił  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  i  $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , odpowiednio dla ścian nośnych i osłonowych. Obudowa balkonu w mieszkaniu nr 4 wykonana została przy użyciu okien z oszkleniem jednokomorowym osadzonych w profilach z PCW (rys. 9.10, 9.11). Ścianę podokienną tworzyła płyta żelbetowa i płyta komorowa poliwęglanowa, zamocowana od wewnątrz balkonu na poziomie pierwotnej balustrady ażurowej.



**Rys. 9.10.** *Zabudowany balkon, mieszkanie nr 4, Lublin.*

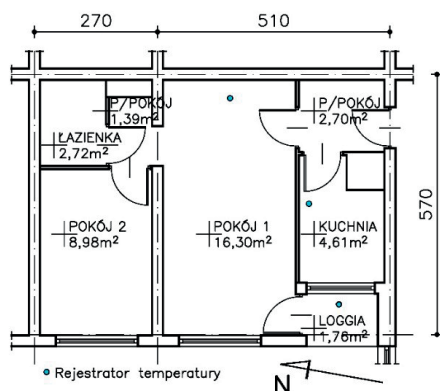


**Rys. 9.11.** Plan mieszkania i rozmieszczenie rejestratorów temperatury, mieszkanie nr 4, Lublin.

Budynek przy ulicy Okrzei to budynek dwuklatkowy, 11. kondygnacyjny, wykonany w technologii Cegła Żerańska w układzie konstrukcyjnym poprzecznym (rys. 9.12, 9.13). Ściany osłonowe o grubości 24 cm wymurowano z betonu komórkowego. Nad ostatnią kondygnacją częściowo znajduje się stropodach dwudzielny wentylowany, a częściowo – pomieszczenia użytkowe przekryte stropodachem pełnym. Wysokość kondygnacji brutto wynosi 2,80 m.

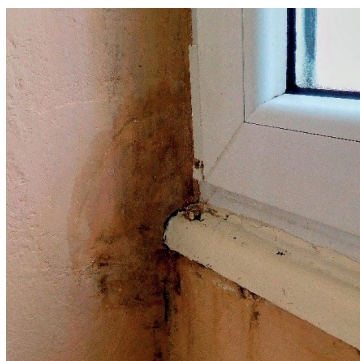


**Rys. 9.12.** Zabudowana loggia, mieszkanie nr 5, Lublin.



**Rys. 9.13.** Plan mieszkania i rozmieszczenie rejestratorów temperatury, mieszkanie nr 5, Lublin.

Ściany zewnętrzne zostały docieplone metodą lekką suchą z zastosowaniem wełny mineralnej o grubości 6 cm i wykończeniem z blachy trapezowej. Orientacyjny współczynnik przenikania ciepła ścian po termomodernizacji wynosił 0,53 W/(m<sup>2</sup>·K) i 0,35 W/(m<sup>2</sup>·K), odpowiednio dla ścian nośnych i osłonowych. W mieszkaniu nr 5 oszklenie loggii to również okna z profili z PCW z oszkleniem jednokomorowym, a ściana podokienna jest murowana. W lokalu tym widoczne są problemy z zagrzybieniem, także na obudowie loggii, prawdopodobnie na skutek niedostatecznej wentylacji pomieszczeń (rys. 9.14).



**Rys. 9.14.** Zagrzybienie ściany loggii stykającej się z szybą windowym, mieszkanie przy ul. Okrzei, Lublin.

## 9.2. Wyniki monitoringu

Rejestracja temperatury odbywała się na balkonach i w wybranych pomieszczeniach mieszkalnych (sąsiadujących z balkonami). Rejestratory na balkonach



umieszczano na ścianach nadprożowych pod płytami balkonowymi (rys. 9.15), lub od spodu płyty balkonowej (mieszkanie nr 5). Wybrane miejsca były stale zacienione, poza balkonem w mieszkaniu przy ul. Baśniowej. Ze względu na jego orientację nie udało się znaleźć miejsca, które nie byłoby okresowo poddane bezpośredniemu działaniu promieniowania słonecznego. Spowodowało to konieczność pominięcia niektórych danych pomiarowych w dalszych analizach – jeżeli odnotowano znaczny wzrost temperatury połączony z małym stopniem zachmurzenia (0 - 2 oktantów, czyli bezchmurnie, prawie bezchmurnie lub mało chmur), wykluczano dane z 12. godzinnego okresu popołudniowego. Pomiary te stanowiły ok. 18% wszystkich obserwacji. W pomieszczeniach mieszkalnych czujniki były montowane na powierzchni mebli, z dala od okien i w miejscach nienasłonecznionych.



**Rys. 9.15.** *Rejestrator temperatury na nadprożu, mieszkanie nr 4, Lublin.*

Dane klimatyczne uwzględnione w analizach pochodziły ze stacji IMGW - PIB w Zamościu i Lublinie (identyfikatory 350230595 i 351220495). Stacja w Zamościu leży na południowym obrzeżu miasta ( $50^{\circ}42'N$ ,  $23^{\circ}15'E$ ) na wysokości 212 m n.p.m. [271], około 2,5 km od monitorowanych budynków. Stacja Lublin-Radawiec jest zlokalizowana na południowy zachód od Lublina ( $51^{\circ}13'N$ ,  $22^{\circ}24'E$ ) na wysokości 238 m n.p.m. [59], w odległości od 10 do 14 km od monitorowanych budynków. Od północy teren ogródka meteorologicznego graniczy z lotniskiem. Dane zostały pobrane z bazy IMGW - PIB dostępnej za pośrednictwem systemu teleinformatycznego pod adresem: <http://dane.imgw.pl>. Dane te zawierały m. in. informacje na temat temperatury powietrza zewnętrznego, wilgotności względnej, ciśnienia atmosferycznego, kierunku i prędkości wiatru, podawane w odstępach godzinowych.

### 9.2.1. Efekt buforowy przestrzeni oszklonej

Podstawowe dane uzyskane na podstawie monitoringu zestawiono w tabelach 9.2 – 9.6. Są to średnie miesięczne temperatury przestrzeni słonecznej oraz pomieszczeń mieszkalnych przylegających do balkonu, uzupełnione o średnie temperatury powietrza zewnętrznego. Temperatury w pomieszczeniach mieszkalnych uśredniono proporcjonalnie do współczynników przenoszenia ciepła przegród pomiędzy balkonem a pomieszczeniami. Jeżeli dane miesięczne były niepełne (np. ze względu na czas pomiarów lub eliminację wyników z okresu bezpośredniego nasłonecznienia czujnika), wartości uśrednione pochodzą z krótszego okresu.

**Tabela 9.2.** Wyniki monitoringu, mieszkanie nr 1, Zamość.

| Rok  | Miesiąc | Średnia temp. zewn. [°C] | Średnia temp. balkon [°C] | Średnia temp. część mieszkalna [°C] | Korelacja między temp. na balkonie a temp. zewnętrzną [-] | Korelacja między temp. na balkonie a zachmurzeniem [-] | Współczynnik korekty temperatury $b_{tr}$ [-] |
|------|---------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 2017 | VII*    | 18,5                     | 26,3                      | 26,6                                | 0,718                                                     | -                                                      | 0,037                                         |
|      | VIII    | 19,7                     | 26,7                      | 27,2                                | 0,854                                                     | -                                                      | 0,073                                         |
|      | IX      | 13,7                     | 18,9                      | 23,7                                | 0,798                                                     | -                                                      | 0,484                                         |
|      | X       | 9,2                      | 14,9                      | 24,0                                | 0,836                                                     | -                                                      | 0,611                                         |
|      | XI      | 3,8                      | 10,1                      | 24,1                                | 0,753                                                     | -                                                      | 0,688                                         |
|      | XII     | 1,8                      | 8,4                       | 24,4                                | 0,689                                                     | -                                                      | 0,708                                         |
| 2018 | I       | -0,2                     | 6,9                       | 24,1                                | 0,817                                                     | -                                                      | 0,709                                         |
|      | II      | -4,4                     | 6,0                       | 24,6                                | 0,641                                                     | -                                                      | 0,640                                         |
|      | III*    | -1,9                     | 9,4                       | 24,3                                | 0,789                                                     | -                                                      | 0,569                                         |

\* dane niepełne

**Tabela 9.3.** Wyniki monitoringu, mieszkanie nr 2, Zamość.

| Rok  | Miesiąc | Średnia temp. zewn. [°C] | Średnia temp. balkon [°C] | Średnia temp. część mieszkalna [°C] | Korelacja między temp. na balkonie a temp. zewnętrzną [-] | Korelacja między temp. na balkonie a zachmurzeniem [-] | Współczynnik korekty temperatury $b_{tr}$ [-] |
|------|---------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 2017 | VII*    | 18,5                     | 24,3                      | 24,6                                | 0,796                                                     | -                                                      | 0,054                                         |
|      | VIII    | 19,7                     | 25,5                      | 25,8                                | 0,861                                                     | -                                                      | 0,055                                         |
|      | IX      | 13,7                     | 17,0                      | 20,6                                | 0,836                                                     | -                                                      | 0,520                                         |
|      | X       | 9,2                      | 13,4                      | 20,6                                | 0,827                                                     | -                                                      | 0,625                                         |
|      | XI      | 3,8                      | 10,3                      | 19,8                                | 0,293                                                     | -                                                      | 0,590                                         |
|      | XII     | 1,8                      | 8,7                       | 19,8                                | 0,153                                                     | -                                                      | 0,616                                         |
| 2018 | I       | -0,2                     | 7,8                       | 19,4                                | 0,560                                                     | -                                                      | 0,595                                         |
|      | II      | -4,4                     | 7,8                       | 19,8                                | 0,245                                                     | -                                                      | 0,496                                         |
|      | III*    | -1,9                     | 11,8                      | 20,7                                | 0,499                                                     | -                                                      | 0,396                                         |

\* dane niepełne



**Tabela 9.4.** Wyniki monitoringu, mieszkanie nr 3, Lublin.

| Rok  | Miesiąc | Średnia temp. zewn. [°C] | Średnia temp. balkon [°C] | Średnia temp. część mieszkalna [°C] | Korelacja między temp. na balkonie a temp. zewnętrzną [-] | Korelacja między temp. na balkonie a zachmurzeniem [-] | Współczynnik korekty temperatury $b_{tr}$ [-] |
|------|---------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 2017 | VII*    | 18,2                     | 22,0                      | 23,8                                | 0,648                                                     | 0,216                                                  | 0,323                                         |
|      | VIII*   | 18,7                     | 21,9                      | 24,7                                | 0,803                                                     | -0,100                                                 | 0,462                                         |
|      | IX*     | 13,1                     | 15,3                      | 21,0                                | 0,801                                                     | -0,024                                                 | 0,730                                         |
|      | X*      | 8,6                      | 10,5                      | 21,3                                | 0,876                                                     | -0,103                                                 | 0,856                                         |
|      | XI*     | 3,3                      | 5,3                       | 21,3                                | 0,913                                                     | 0,085                                                  | 0,891                                         |
|      | XII*    | 1,6                      | 3,4                       | 21,3                                | 0,888                                                     | -0,070                                                 | 0,910                                         |
| 2018 | I*      | -0,2                     | 2,1                       | 21,3                                | 0,912                                                     | 0,204                                                  | 0,890                                         |
|      | II*     | -3,8                     | -0,1                      | 21,3                                | 0,938                                                     | 0,314                                                  | 0,852                                         |
|      | III*    | -3,8                     | -0,3                      | 21,8                                | 0,950                                                     | 0,609                                                  | 0,863                                         |

\* dane niepełne

**Tabela 9.5.** Wyniki monitoringu, mieszkanie nr 4, Lublin.

| Rok  | Miesiąc | Średnia temp. zewn. [°C] | Średnia temp. balkon [°C] | Średnia temp. część mieszkalna [°C] | Korelacja między temp. na balkonie a temp. zewnętrzną [-] | Korelacja między temp. na balkonie a zachmurzeniem [-] | Współczynnik korekty temperatury $b_{tr}$ [-] |
|------|---------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 2018 | I*      | -0,5                     | 4,9                       | 21,6                                | 0,906                                                     | -0,031                                                 | 0,755                                         |
|      | II      | -4,1                     | 5,0                       | 21,9                                | 0,744                                                     | 0,096                                                  | 0,651                                         |
|      | III     | -0,5                     | 7,5                       | 21,8                                | 0,868                                                     | 0,188                                                  | 0,640                                         |
|      | IV      | 13,0                     | 18,0                      | 21,6                                | 0,855                                                     | -0,007                                                 | 0,422                                         |
|      | V       | 16,7                     | 20,2                      | 21,5                                | 0,813                                                     | -0,269                                                 | 0,283                                         |
|      | VI      | 18,2                     | 22,0                      | 23,0                                | 0,812                                                     | -0,116                                                 | 0,206                                         |
|      | VII     | 19,9                     | 23,0                      | 23,4                                | 0,798                                                     | -0,238                                                 | 0,120                                         |
|      | VIII    | 20,2                     | 24,0                      | 24,4                                | 0,777                                                     | -0,028                                                 | 0,102                                         |
|      | IX*     | 16,5                     | 19,4                      | 21,8                                | 0,814                                                     | -0,254                                                 | 0,453                                         |

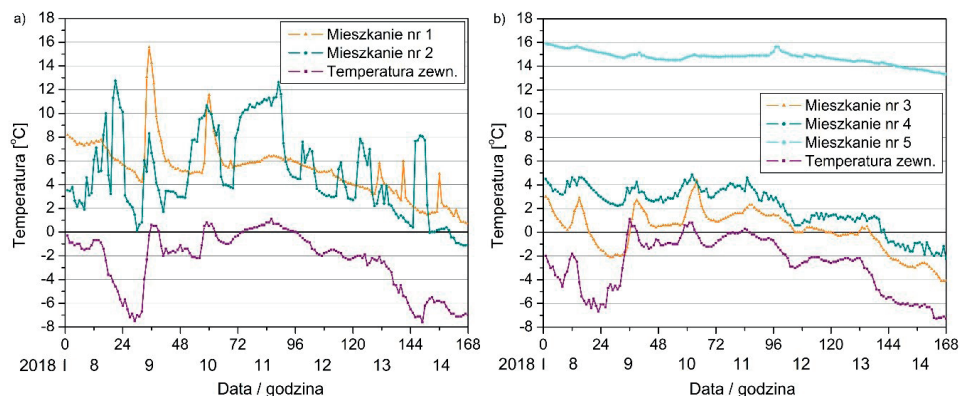
\* dane niepełne

**Tabela 9.6.** Wyniki monitoringu, mieszkanie nr 5, Lublin.

| Rok  | Miesiąc | Średnia temp. zewn. [°C] | Średnia temp. balkon [°C] | Średnia temp. część mieszkalna [°C] | Korelacja między temp. na balkonie a temp. zewnętrzną [-] | Korelacja między temp. na balkonie a zachmurzeniem [-] | Współczynnik korekty temperatury $b_{tr}$ [-] |
|------|---------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 2018 | I*      | -0,7                     | 14,8                      | 23,4                                | 0,493                                                     | 0,093                                                  | 0,357                                         |
|      | II      | -4,1                     | 14,5                      | 24,2                                | 0,493                                                     | 0,264                                                  | 0,342                                         |
|      | III     | -0,5                     | 16,8                      | 24,5                                | 0,775                                                     | 0,253                                                  | 0,309                                         |
|      | IV      | 13,0                     | 23,5                      | 25,9                                | 0,483                                                     | -0,099                                                 | 0,188                                         |
|      | V       | 16,7                     | 26,4                      | 26,6                                | 0,376                                                     | -0,467                                                 | 0,023                                         |
|      | VI      | 18,2                     | 28,2                      | 28,2                                | 0,367                                                     | -0,323                                                 | 0,003                                         |
|      | VII     | 19,9                     | 27,2                      | 27,5                                | 0,498                                                     | -0,206                                                 | 0,032                                         |
|      | VIII    | 20,2                     | 28,9                      | 29,2                                | 0,458                                                     | -0,125                                                 | 0,025                                         |
|      | IX*     | 16,1                     | 25,1                      | 25,7                                | 0,576                                                     | -0,010                                                 | 0,055                                         |

\* dane niepełne

Temperatura powietrza w przestrzeni balkonu na ogół przewyższała temperaturę powietrza zewnętrznego (91,6% – 98,5% czasu pomiarów), przy czym różnice te nie były jednakowe w ciągu roku. Miesiące, w których wzrost był największy to styczeń, luty i marzec, czyli okresy o najniższych średnich temperaturach powietrza zewnętrznego. Biorąc pod uwagę rodzaj balkonu, największy wzrost temperatury, wynoszący średnio od 7,3°C do 18,6°C, zaobserwowano w mieszkaniu nr 5 (rys 9.16 b). Loggia była tam dość szczelnie obudowana (zamykane okna dwuszybowe w profilach z PCW i murowana ściana podokienna), a lokatorzy czasami pozostawiali otwarte drzwi między nią a sąsiednim pokojem. Najmniejsze różnice występowały w przypadku balkonów o dużym stopniu infiltracji powietrza – były to balkony w mieszkaniach nr 3 (obudowa ze szczelinami pomiędzy szybami wynoszącymi około 17 mm) i 4 (stałe wietrzony przez pozostawianie otwartego okna).



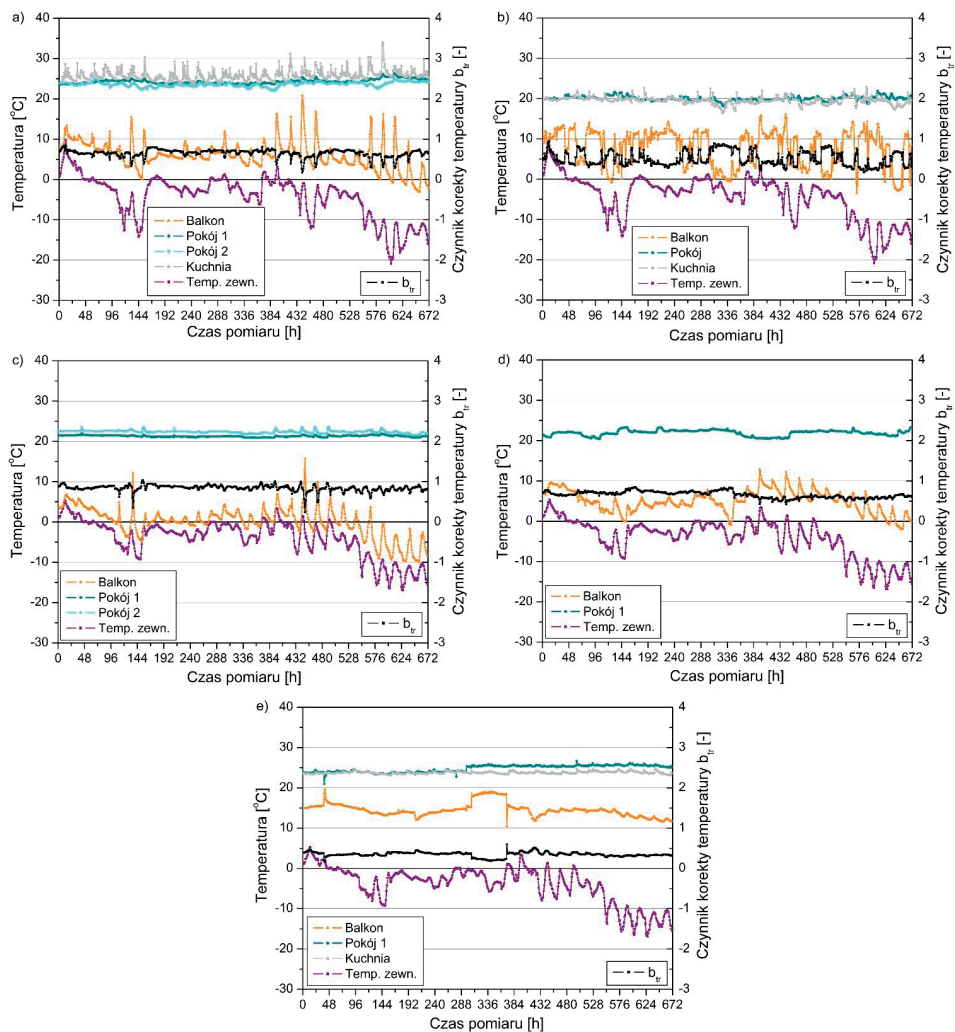
**Rys. 9.16.** Temperatury w obszarze zabudowanych balkonów w okresie od 8 do 14 I 2018: a) mieszkania w Zamościu, b) mieszkania w Lublinie.

Okresy temperatury niższej niż temperatura otoczenia były stosunkowo krótkie (0,8% do 8,4% czasu pomiarów), a czas ich występowania wiązał się z dobowym cyklem temperatury i pojemnością termiczną obudowy. W balkonach o najlżejszej konstrukcji (obudowa z płyt poliwęglanowych, częste wietrzenie – mieszkania nr 3 i 4) spadki temperatury poniżej temperatury otoczenia wystąpiły odpowiednio między 7 rano a 12 i między 6 a 9 rano, podczas wzrostu temperatury powietrza po chłodniejszej nocy. Balkon skierowany na wschód (mieszkanie nr 4) nagrzewał się nieco szybciej, mimo częściowego przesłaniania przez drzewa i budynki sąsiednie. W balkonach o cięższej obudowie z murowanymi ścianami podokiennymi lub bocznymi (mieszkania nr 1, 2 i 5) okresowe spadki temperatury występują odpowiednio pomiędzy godziną 12 a 15 i 10 a 15. Wiązało się to z większą pojemnością termiczną obudowy i powolniejszym nagrzewaniem, a także z okresowym zacięciem balkonów odpowiednio przez murowaną ścianę boczną lub szyb windy. Różnice te na ogół nie przekraczały 5°C.

Temperatura powietrza na balkonach była dość dobrze skorelowana z temperaturą powietrza zewnętrznego. Największa współzależność przebiegu temperatur wystąpiła dla balkonu w mieszkaniu nr 3, o najmniej szczelnej i słabo izolowanej obudowie, a także dla balkonu w mieszkaniu nr 4, gdzie prawie przez cały czas było otwarte jedno z okien. Jest to oczywiście powiązane z możliwością napływu powietrza zewnętrznego i bardziej intensywną wymianą ciepła ze środowiskiem. Najniższe współczynniki korelacji charakteryzowały loggię w mieszkaniu nr 5, o dobrze izolowanej i szczelnej obudowie.

Współzależności między temperaturą powietrza na balkonach a stopniem zachmurzenia były znacznie słabsze. Analizy przeprowadzono jedynie dla mieszkań w Lublinie, ponieważ w bazie danych IMGW – PIB brakowało danych dotyczących stopnia zachmurzenia na stacji w Zamościu. Pomiędzy grudniem a lutym współczynniki korelacji były dodatnie, co oznacza wzrost temperatury wraz ze wzrostem zachmurzenia. Można to wytłumaczyć wyższą temperaturą powietrza w ciągu zimy w okresach niżowych, o wysokim stopniu zachmurzenia. W pozostałych miesiącach (poza październikiem 2017) współczynniki korelacji były ujemne, czyli im mniejsze zachmurzenie tym wyższa temperatura, powiązana oczywiście z bardziej intensywnym promieniowaniem słonecznym.

Sposobem oceny wpływu obudowanych balkonów na wielkość strat ciepła z pomieszczeń mieszkalnych może być czynnik korekty temperatury  $b_{tr}$  zdefiniowany w normie [216].

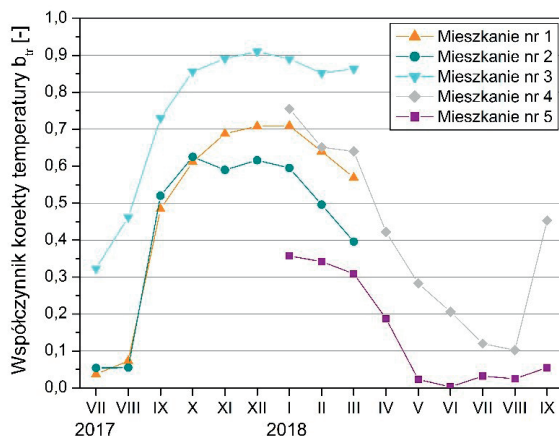


**Rys. 9.17.** *Temperatury w mieszkaniach w okresie od 1 do 28 II 2018 i czynniki korekty temperatury: a) mieszkanie nr 1, b) mieszkanie nr 2, c) mieszkanie nr 3, d) mieszkanie nr 4, e) mieszkanie nr 5.*

Na podstawie pomiarów temperatury w ciągu sezonu grzewczego wyznaczono chwilowe i średnie miesięczne wielkości współczynnika  $b_{tr}$  (rys. 9.17, 9.18). W ciągu poszczególnych miesięcy wartości chwilowe ulegały pewnym zmianom, przy obliczaniu sezonowych strat ciepła i ocenie funkcjonowania obudowanych balkonów bardziej czytelne może być więc korzystanie ze średnich miesięcznych (rys. 9.18).

We wszystkich mieszkaniach najwyższe czynniki korekty temperatury zaobserwowano w miesiącach jesiennych i zimowych (listopad, grudzień i styczeń

w mieszkaniach gdzie prowadzono pomiary podczas pełnego sezonu grzewczego, i styczeń, luty, marzec w mieszkaniach w których pomiary rozpoczęto w styczniu 2018 roku). Najniższe współczynniki otrzymano we wrześniu i okresie wiosennym, czyli w marcu, kwietniu i maju.



Rys. 9.18. Średnie miesięczne czynniki korekty temperatury.

Najmniejszy wpływ na ograniczenie strat ciepła z mieszkania miał balkon z obudową lekką, o dużym stopniu infiltracji powietrza (mieszkanie nr 3). Współczynnik  $b_{tr}$  zmieniał się tutaj podczas sezonu grzewczego w zakresie od 0,730 (wrzesień) do 0,910 (grudzień). Mimo małej szczelności i niskiej izolacyjności obudowy, wpływ przestrzeni słonecznej na zmniejszenie strat ciepła był widoczny, chociaż raczej niewielki (3,8%). Następnymi pod względem efektywności okazały się konstrukcje w mieszkaniach nr 1 i 4 ( $b_{tr}$  odpowiednio od 0,484 we wrześniu do 0,709 w styczniu i od 0,283 w maju do 0,755 w styczniu). W mieszkaniu nr 4 balkon był wykorzystywany jako palarnia, wietrzono go więc stale w okresie zimowym. W ciągu dwóch tygodni lutego (od 15 do 28) na prośbę prowadzącej badania okno było zamknięte, i średni współczynnik korekty temperatury wyniósł wtedy 0,588, czyli był zauważalnie niższy niż w pozostałym okresie zimowym. W mieszkaniach nr 1 i 2, mimo jednakowej konstrukcji i orientacji balkonów, współczynniki  $b_{tr}$  różniły się od 1% (październik) do prawie 40% (marzec). Powodem były prawdopodobnie inne sposoby użytkowania pomieszczeń, ale ponieważ nie prowadzono szczegółowej rejestracji np. częstotliwości otwierania okien, trudno jest jednoznacznie ocenić jakie czynniki odgrywają w tym przypadku decydującą rolę. Przyczyną mogły być też różnice temperatury grzewczej, która była wyższa w mieszkaniu nr 1. W przypadku zabudowanej loggii w mieszkaniu nr 5 czynniki korekty temperatury zmieniały się od 0,023 (maj) do 0,357 (styczeń), osiągając najniższe wielkości pośród monitorowanych mieszkań. Odnotowano tutaj również najwyższe temperatury powietrza w przestrzeni szklarniowej, będące

skutkiem szczelnej zabudowy i małej powierzchni przegród oddających ciepło – loggia miała tylko jedną ścianę stykającą się z powietrzem zewnętrznym.

W monitorowanych mieszkaniach obliczono także straty ciepła przez obudowę w miesiącach zaliczanych do sezonu grzewczego. Metodę obliczeń przyjęto zgodnie z [267], posługując się wyznaczonymi doświadczalnie współczynnikami redukcji temperatury  $b_{tr}$ . Współczynnik strat ciepła  $H_{tr}$  pomiędzy pomieszczeniem ogrzewanym z nieogrzewaną przestrzenią obliczono zgodnie z [241, 267] jako:

$$H_{tr} = b_{tr} \cdot H_{ib} \text{ [W/K]}, \quad (8.1)$$

gdzie:

$H_{ib}$  – współczynnik strat ciepła między pomieszczeniem ogrzewanym a nieogrzewanym [W/K].

Wyniki przedstawiono w tabelach 9.7 – 9.11 i na rys. 9.19.

**Tabela 9.7.** Redukcja strat ciepła, mieszkanie nr 1, Zamość.

| Rok  | Miesiąc | $H_{tr}$ balkon otwarty [W/K] | $H_{tr}$ balkon obudowany [W/K] | Straty ciepła przez obudowę balkon otwarty [kWh] | Straty ciepła przez obudowę balkon oszklony [kWh] | Redukcja strat ciepła [%] |
|------|---------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------|
| 2017 | IX      | 68,767                        | 59,029                          | 485,2                                            | 416,5                                             | 15,6                      |
|      | X       | 68,767                        | 60,316                          | 747,0                                            | 655,2                                             | 11,7                      |
|      | XI      | 68,767                        | 62,330                          | 990,2                                            | 897,6                                             | 9,4                       |
|      | XII     | 68,767                        | 62,808                          | 1146,0                                           | 1046,7                                            | 8,8                       |
| 2018 | I       | 68,767                        | 62,787                          | 1233,0                                           | 1125,8                                            | 8,8                       |
|      | II      | 68,767                        | 61,458                          | 1330,9                                           | 1189,4                                            | 10,9                      |
|      | III*    | 68,767                        | 59,776                          | 1136,1                                           | 987,6                                             | 13,0                      |
| Suma | 7068,5  | 6318,8                        | 10,7                            |                                                  |                                                   |                           |

\* dane niepełne

**Tabela 9.8.** Redukcja strat ciepła, mieszkanie nr 2, Zamość.

| Rok  | Miesiąc | $H_{tr}$ balkon otwarty [W/K] | $H_{tr}$ balkon obudowany [W/K] | Straty ciepła przez obudowę balkon otwarty [kWh] | Straty ciepła przez obudowę balkon oszklony [kWh] | Redukcja strat ciepła [%] |
|------|---------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------|
| 2017 | IX      | 35,455                        | 25,145                          | 181,0                                            | 128,4                                             | 27,9                      |
|      | X       | 35,455                        | 26,960                          | 306,0                                            | 232,7                                             | 21,8                      |
|      | XI      | 35,455                        | 27,310                          | 411,0                                            | 316,6                                             | 23,8                      |
|      | XII     | 35,455                        | 27,929                          | 474,8                                            | 374,0                                             | 22,3                      |
| 2018 | I       | 35,455                        | 27,228                          | 519,7                                            | 399,1                                             | 23,6                      |
|      | II      | 35,455                        | 25,351                          | 579,0                                            | 414,0                                             | 29,3                      |
|      | III*    | 35,455                        | 23,227                          | 511,7                                            | 335,2                                             | 35,1                      |
| Suma | 2983,1  | 2199,9                        | 26,6                            |                                                  |                                                   |                           |

\* dane niepełne

**Tabela 9.9. Redukcja strat ciepła, mieszkanie nr 3, Lublin.**

| Rok  | Miesiąc | H <sub>tr</sub> balkon<br>otwarty<br>[W/K] | H <sub>tr</sub> balkon<br>obudowany<br>[W/K] | Straty ciepła przez<br>obudowę<br>balkon otwarty<br>[kWh] | Straty ciepła przez<br>obudowę<br>balkon oszklony<br>[kWh] | Redukcja<br>strat ciepła<br>[%] |
|------|---------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 2017 | IX*     | 42,304                                     | 39,111                                       | 172,4                                                     | 159,4                                                      | 7,9                             |
|      | X*      | 42,304                                     | 40,757                                       | 341,7                                                     | 329,2                                                      | 4,2                             |
|      | XI*     | 42,304                                     | 41,017                                       | 466,0                                                     | 451,8                                                      | 3,2                             |
|      | XII*    | 42,304                                     | 41,252                                       | 570,0                                                     | 555,9                                                      | 2,6                             |
| 2018 | I*      | 42,304                                     | 40,980                                       | 622,1                                                     | 602,6                                                      | 3,2                             |
|      | II*     | 42,304                                     | 40,509                                       | 637,1                                                     | 610,1                                                      | 4,3                             |
|      | III*    | 42,304                                     | 40,633                                       | 284,8                                                     | 273,6                                                      | 4,0                             |
| Suma | 3094,2  | 2982,6                                     | 3,8                                          |                                                           |                                                            |                                 |

\* dane niepełne

**Tabela 9.10. Redukcja strat ciepła, mieszkanie nr 4, Lublin.**

| Rok  | Miesiąc | H <sub>tr</sub> balkon<br>otwarty<br>[W/K] | H <sub>tr</sub> balkon<br>obudowany<br>[W/K] | Straty ciepła przez<br>obudowę<br>balkon otwarty<br>[kWh] | Straty ciepła przez<br>obudowę<br>balkon oszklony<br>[kWh] | Redukcja<br>strat ciepła<br>[%] |
|------|---------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 2018 | I*      | 105,982                                    | 102,091                                      | 1646,6                                                    | 1586,1                                                     | 3,6                             |
|      | II      | 105,982                                    | 100,570                                      | 1851,7                                                    | 1757,2                                                     | 5,2                             |
|      | III     | 105,982                                    | 100,193                                      | 1758,4                                                    | 1662,3                                                     | 5,3                             |
|      | IV      | 105,982                                    | 98,421                                       | 656,2                                                     | 609,4                                                      | 8,6                             |
|      | V       | 105,982                                    | 105,715                                      | 378,5                                                     | 377,5                                                      | 10,6                            |
|      | IX*     | 105,982                                    | 96,460                                       | 330,8                                                     | 301,1                                                      | 8,1                             |
| Suma | 6622,2  | 6293,7                                     | 5,6                                          |                                                           |                                                            |                                 |

\* dane niepełne

**Tabela 9.11. Redukcja strat ciepła, mieszkanie nr 5, Lublin.**

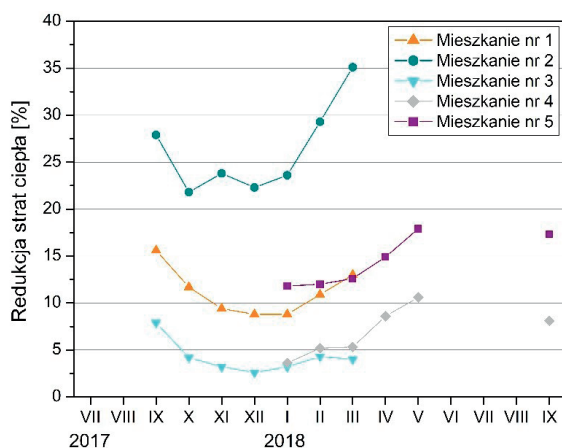
| Rok  | Miesiąc | H <sub>tr</sub> balkon<br>otwarty<br>[W/K] | H <sub>tr</sub> balkon<br>obudowany<br>[W/K] | Straty ciepła przez<br>obudowę<br>balkon otwarty<br>[kWh] | Straty ciepła przez<br>obudowę<br>balkon oszklony<br>[kWh] | Redukcja<br>strat ciepła<br>[%] |
|------|---------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 2018 | I*      | 65,455                                     | 57,817                                       | 1044,3                                                    | 922,4                                                      | 11,8                            |
|      | II      | 65,455                                     | 57,625                                       | 1244,8                                                    | 1095,9                                                     | 12,0                            |
|      | III     | 65,455                                     | 57,158                                       | 1217,5                                                    | 1063,1                                                     | 12,6                            |
|      | IV      | 65,455                                     | 55,901                                       | 607,9                                                     | 519,2                                                      | 14,9                            |
|      | V       | 65,455                                     | 53,818                                       | 482,1                                                     | 396,4                                                      | 17,9                            |
|      | IX*     | 65,455                                     | 54,118                                       | 386,4                                                     | 319,5                                                      | 17,3                            |
| Suma | 4983,1  | 4316,6                                     | 13,4                                         |                                                           |                                                            |                                 |

\* dane niepełne



W każdym z monitorowanych mieszkań dzięki zabudowie balkonów osiągnięto zmniejszenie strat ciepła przez obudowę wynoszące średnio od 3,8% (mieszkanie nr 3) do 26,6% (mieszkanie nr 2). Balkony o najmniej szczelnej obudowie (na skutek dużych szczelin między szybami lub stałego wietrzenia) okazały się najmniej skutecznymi strefami buforowymi, a średnia redukcja strat ciepła w ciągu sezonu grzewczego nie przekroczyła 6%. W przypadku mieszkania nr 4 duży wpływ na małą skuteczność przestrzeni szklarniowej miały także znaczne straty ciepła przez ściany zewnętrzne i podłogę parteru nad nieogrzewanymi piwnicami. W mieszkaniach o mniejszej powierzchni oszklona przestrzeń buforowa dała znacznie większe efekty – są to mieszkania nr 1 i 5, gdzie średnia redukcja strat ciepła wyniosła odpowiednio 10,7% i 13,4% mimo lokalizacji na najwyższej kondygnacji. W mieszkaniach nr 1 i 2 zabudowa balkonów była taka sama, jednak jej skuteczność okazała się znacznie mniejsza w mieszkaniu o większej powierzchni (nr 1), gdzie redukcja strat ciepła wyniosła średnio 10,7%.

Straty ciepła ograniczono dzięki zabudowanym balkonom w największym stopniu w okresie wiosennym i jesiennym, czyli w miesiącach od marca do maja oraz w październiku. W listopadzie, grudniu i styczniu procentowa redukcja strat ciepła okazała się najmniejsza (rys. 9.19).

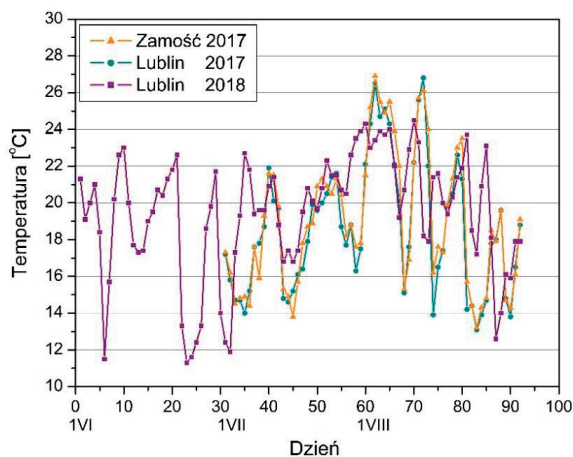


Rys. 9.19. Redukcja strat ciepła podczas sezonu grzewczego w poszczególnych mieszkaniach.

### 9.2.2. Ocena przegrzewania pomieszczeń

Systemy pasywne zawsze niosą ze sobą ryzyko przegrzewania pomieszczeń w miesiącach letnich, kiedy natężenie promieniowania słonecznego i temperatury powietrza zewnętrznego rosną. Ze względu na to, że monitorowane mieszkania wyposażone były w wentylację grawitacyjną, ocenę warunków termicznych w pomieszczeniach sąsiadujących z balkonami wykonano w oparciu o normę

[237] i koncepcję komfortu adaptacyjnego. Analizy przeprowadzono wykorzystując dane z czerwca, lipca, i sierpnia 2017 i 2018 roku.

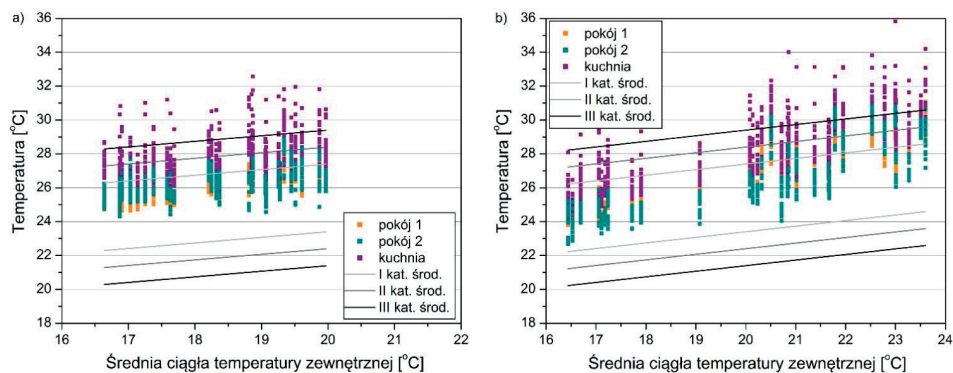


**Rys. 9.20.** Średnie dobowe temperatury w Zamościu i Lublinie, czerwiec, lipiec i sierpień 2017 i 2018 roku.

Przebieg temperatury w Zamościu i Lublinie w lipcu i sierpniu 2017 roku był podobny, występujące różnice spowodowane są odległością między miastami (około 85 km). Najwyższe temperatury wystąpiły w pierwszej połowie sierpnia, podobnie jak w 2018 roku, w tym miesiącu ryzyko przegrzewania będzie więc największe (rys. 9.20). Wpływ oszklonych balkonów na wymianę ciepła wykazał pewne stałe tendencje w ciągu roku – w mieszkaniach o najmniejszej redukcji strat ciepła w sezonie grzewczym zaobserwowano najniższe letnie temperatury w pomieszczeniach sąsiadujących z balkonami i na odwrót.

Mieszkania nr 1 i 2, mimo jednakowej orientacji i konstrukcji balkonu, różniły się pod względem komfortu użytkowania w okresie letnim (rys. 9.21, 9.22, tabela 9.12, 9.13). W mieszkaniu nr 1 okresy przegrzewania w pokojach 1 i 2 były krótsze niż w kuchni, przy czym w pokoju 2 (o mniejszej powierzchni) liczba godzin o wyższej temperaturze była większa. Najmniej komfortowym pomieszczeniem okazała się kuchnia, gdzie liczba godzin o temperaturze przekraczającej warunki II i III kategorii środowiska wewnętrznego wynosiła około 39% i 18% czasu obserwacji. Było to spowodowane dużymi zyskami bytowymi oraz problemami z wentylacją grawitacyjną – kratki wentylacyjne w kuchni były częściowo niedrożne. Jedynie pokój 1 spełnił warunki III kategorii środowiska wewnętrznego.

W mieszkaniu nr 2 również tylko pokój spełnił wymagania III kategorii środowiska wewnętrznego. Temperatury wewnętrzne wskazały nie tylko na okresowe przegrzewanie ale też i na wychłodzenie pomieszczeń – duże znaczenie miały tutaj indywidualne preferencje lokatorki i dość intensywne wietrzenie mieszkania.

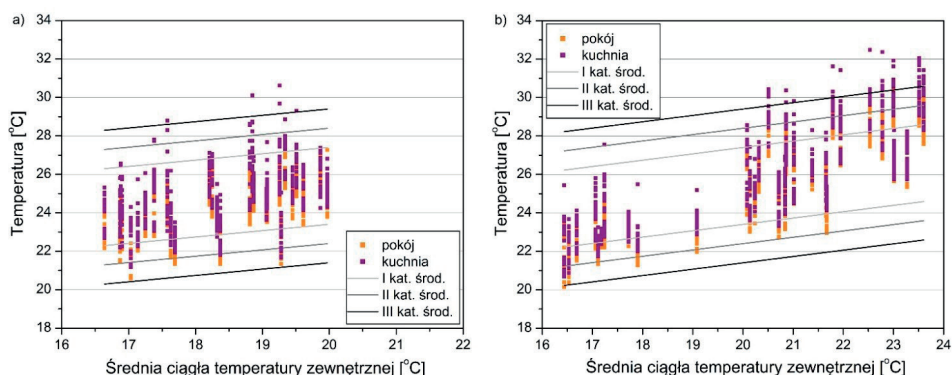


Rys. 9.21. Ocena komfortu cieplnego, mieszkanie nr 1, Zamość: a) lipiec 2017, b) sierpień 2017.

Tabela 9.12. Liczba godzin poza poszczególnymi kategoriami środowiska wewnętrznego, mieszkanie nr 1, Zamość.

| Okres badań                            | I kategoria |      |      |         |    |   | II kategoria |     |      |         |    |   | III kategoria |     |      |         |    |   |
|----------------------------------------|-------------|------|------|---------|----|---|--------------|-----|------|---------|----|---|---------------|-----|------|---------|----|---|
|                                        | powyżej     |      |      | poniżej |    |   | powyżej      |     |      | poniżej |    |   | powyżej       |     |      | poniżej |    |   |
|                                        | P1          | P2   | K    | P1      | P2 | K | P1           | P2  | K    | P1      | P2 | K | P1            | P2  | K    | P1      | P2 | K |
| 2017                                   |             |      |      |         |    |   |              |     |      |         |    |   |               |     |      |         |    |   |
| VI                                     | -           | -    | -    | -       | -  | - | -            | -   | -    | -       | -  | - | -             | -   | -    | -       | -  | - |
| VII*                                   | 53          | 126  | 507  | 0       | 0  | 0 | 0            | 15  | 246  | 0       | 0  | 0 | 0             | 0   | 88   | 0       | 0  | 0 |
| VIII                                   | 224         | 196  | 497  | 0       | 0  | 0 | 95           | 114 | 313  | 0       | 0  | 0 | 2             | 43  | 169  | 0       | 0  | 0 |
| Suma                                   | 277         | 322  | 1004 | 0       | 0  | 0 | 95           | 129 | 559  | 0       | 0  | 0 | 2             | 43  | 257  | 0       | 0  | 0 |
| Udział godzin w okresie obserwacji [%] | 19,4        | 22,5 | 70,3 | 0       | 0  | 0 | 6,6          | 9,0 | 39,1 | 0       | 0  | 0 | 0,1           | 3,0 | 18,0 | 0       | 0  | 0 |

\* dane niepełne



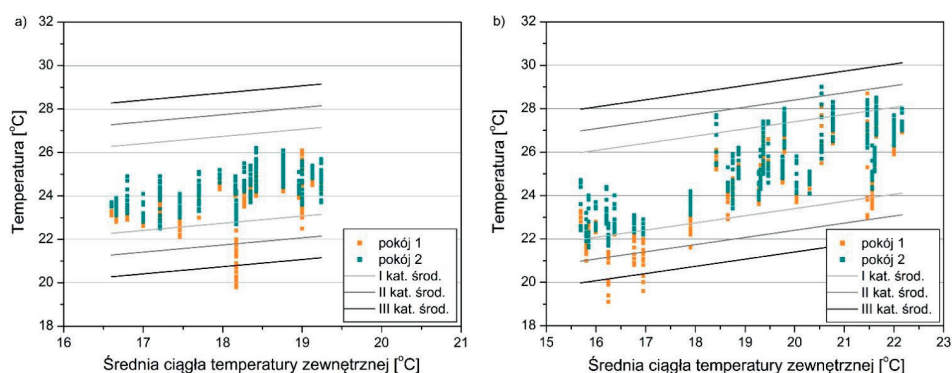
Rys. 9.22. Ocena komfortu cieplnego, mieszkanie nr 2, Zamość: a) lipiec 2017, b) sierpień 2017.

**Tabela 9.13.** Liczba godzin poza poszczególnymi kategoriami środowiska wewnętrznego, mieszkanie nr 2, Zamość.

| Okres badań                            | I kategoria |      |      |         |     |      | II kategoria |     |     |         |     |   | III kategoria |     |      |         |    |   |
|----------------------------------------|-------------|------|------|---------|-----|------|--------------|-----|-----|---------|-----|---|---------------|-----|------|---------|----|---|
|                                        | powyżej     |      |      | poniżej |     |      | powyżej      |     |     | poniżej |     |   | powyżej       |     |      | poniżej |    |   |
|                                        | P           | K    | P    | K       | P   | K    | P            | K   | P   | K       | P   | K | P1            | P2  | K    | P1      | P2 | K |
| 2017                                   | -           | -    | -    | -       | -   | -    | -            | -   | -   | -       | -   | - | -             | -   | -    | -       | -  | - |
| VI                                     | -           | -    | -    | -       | -   | -    | -            | -   | -   | -       | -   | - | -             | -   | -    | -       | -  | - |
| VII*                                   | 10          | 61   | 85   | 55      | 0   | 14   | 14           | 7   | 0   | 5       | 0   | 0 | 0             | 0   | 88   | 0       | 0  | 0 |
| VIII                                   | 156         | 200  | 123  | 66      | 65  | 131  | 15           | 5   | 2   | 43      | 1   | 0 | 2             | 43  | 169  | 0       | 0  | 0 |
| Suma                                   | 166         | 261  | 208  | 121     | 65  | 145  | 29           | 12  | 2   | 48      | 1   | 0 | 2             | 43  | 257  | 0       | 0  | 0 |
| Udział godzin w okresie obserwacji [%] | 11,6        | 18,3 | 14,6 | 8,5     | 4,5 | 10,1 | 2,0          | 0,8 | 0,1 | 3,4     | 0,1 | 0 | 0,1           | 3,0 | 18,0 | 0       | 0  | 0 |

\* dane niepełne

W mieszkaniu nr 3 temperatury panujące w sypialni (pokój 1) nie przekroczyły górnej granicy wymagań stawianych I kategorii, ale ze względu na okresowe wychłodzenie pomieszczenie to nie mogło być do niej zakwalifikowane (rys. 9.23). Pokój 2 (salon połączony z kuchnią skierowany na stronę południowo-wschodnią) spełnił wymagania II kategorii środowiska wewnętrznego zarówno z uwzględnieniem przegrzewania i wychładzania. Mieszkanie było użytkowane przez jedną osobę i charakteryzowało się najmniejszymi zyskami bytowymi spośród badanych lokali. Okno w pokoju 2 były prawie stale uchylone w ciągu lata, podobnie jak okno (a często i drzwi balkonowe) wychodzące na balkon zabudowany. Te czynniki wyeliminowały przegrzewanie, ale też spowodowały obniżenie temperatury i przekroczenie dolnej granicy III kategorii użytkowania (tabela 9.14).



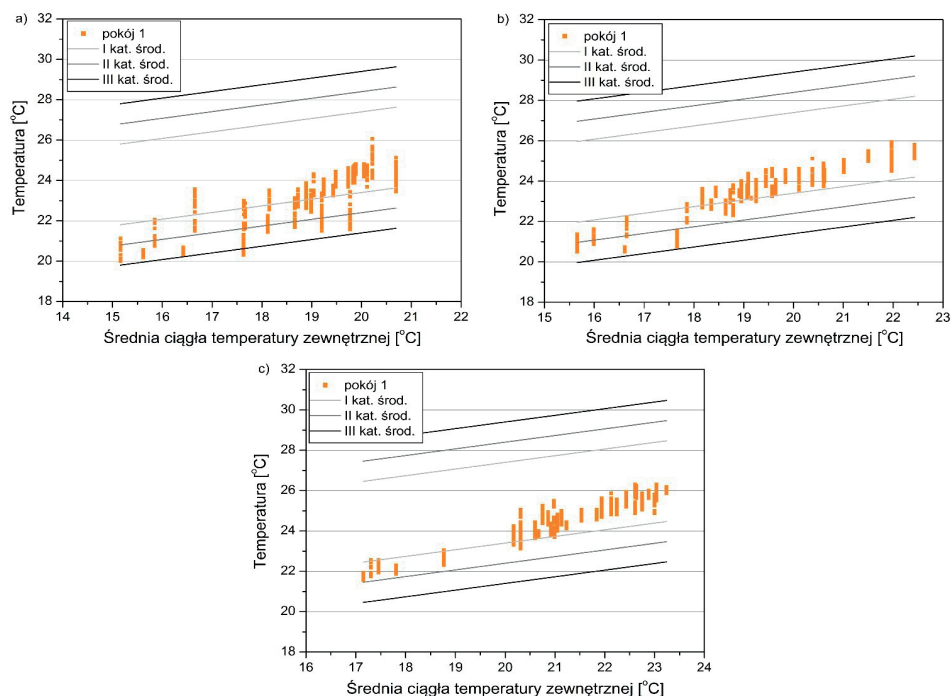
**Rys. 9.23.** Ocena komfortu cieplnego, mieszkanie nr 3, Lublin: a) lipiec 2017, b) sierpień 2017.

**Tabela 9.14.** Liczba godzin poza poszczególnymi kategoriami środowiska wewnętrznego, mieszkanie nr 3, Lublin.

| Okres badań                            | I kategoria |     |      |         |    |     | II kategoria |    |    |         |     |    | III kategoria |     |      |         |    |   |
|----------------------------------------|-------------|-----|------|---------|----|-----|--------------|----|----|---------|-----|----|---------------|-----|------|---------|----|---|
|                                        | powyżej     |     |      | poniżej |    |     | powyżej      |    |    | poniżej |     |    | powyżej       |     |      | poniżej |    |   |
| 2017                                   | P1          | P2  | P1   | P2      | P1 | P2  | P1           | P2 | P1 | P2      | P1  | P2 | P1            | P2  | K    | P1      | P2 | K |
| VI                                     | -           | -   | -    | -       | -  | -   | -            | -  | -  | -       | -   | -  | -             | -   | -    | -       | -  | - |
| VII*                                   | 0           | 0   | 38   | 2       | 0  | 0   | 16           | 0  | 0  | 0       | 8   | 0  | 0             | 0   | 88   | 0       | 0  | 0 |
| VIII*                                  | 7           | 41  | 74   | 20      | 0  | 2   | 23           | 0  | 0  | 0       | 7   | 0  | 2             | 43  | 169  | 0       | 0  | 0 |
| Suma                                   | 7           | 41  | 112  | 22      | 0  | 2   | 39           | 0  | 0  | 0       | 15  | 0  | 2             | 43  | 257  | 0       | 0  | 0 |
| Udział godzin w okresie obserwacji [%] | 0,8         | 4,8 | 13,0 | 2,6     | 0  | 0,2 | 4,5          | 0  | 0  | 0       | 1,7 | 0  | 0,1           | 3,0 | 18,0 | 0       | 0  | 0 |

\* dane niepełne

Podobna sytuacja miała miejsce w lokalu nr 4, pomimo wyższych zysków bytowych. Tutaj również temperatury w pokoju sąsiadującym z balkonem były raczej zbyt niskie niż zbyt wysokie, co można przypisać częstemu wietrzeniu i oddawaniu ciepła przez stosunkowo słabo izolowaną podłogę nad nieogrzewanymi piwnicami. Ze względu na okresowe wychłodzenie pomieszczenie to zakwalifikowano jedynie do III kategorii środowiska wewnętrznego (rys. 9.24, tabela 9.15).

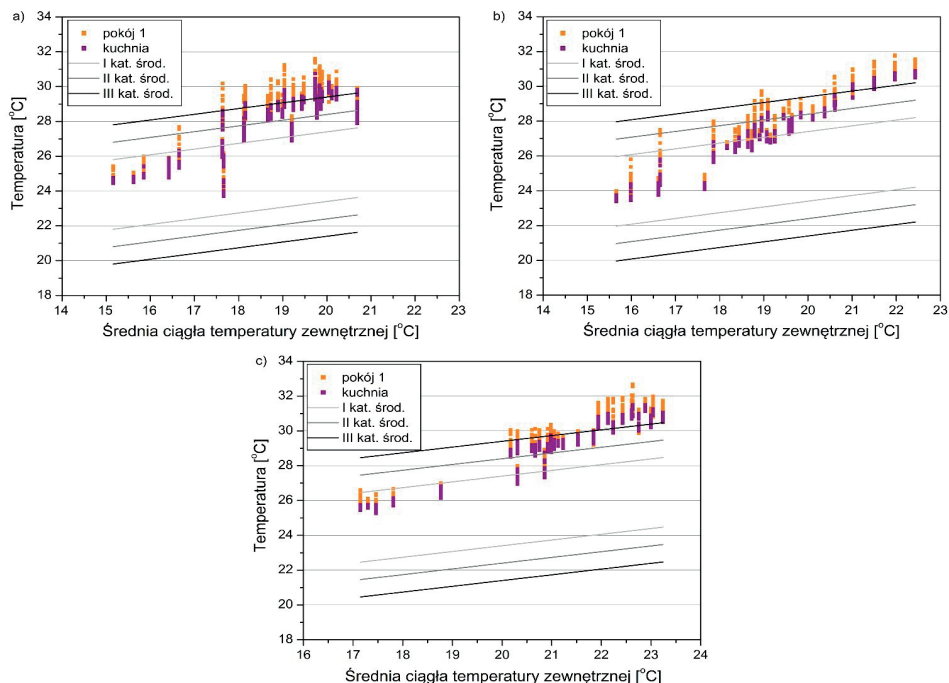


**Rys. 9.24.** Ocena komfortu cieplnego, mieszkanie nr 4, Lublin: a) czerwiec 2018, b) lipiec 2018, c) sierpień 2018.

**Tabela 9.15.** Liczba godzin poza poszczególnymi kategoriami środowiska wewnętrznego, mieszkanie nr 4, Lublin.

| Okres badań                            | I kategoria |         | II kategoria |         | III kategoria |         |
|----------------------------------------|-------------|---------|--------------|---------|---------------|---------|
|                                        | powyżej     | poniżej | powyżej      | poniżej | powyżej       | poniżej |
| 2018                                   | P1          | P1      | P1           | P1      | P1            | P1      |
| VI                                     | 0           | 296     | 0            | 141     | 0             | 11      |
| VII                                    | 0           | 204     | 0            | 77      | 0             | 0       |
| VIII                                   | 0           | 131     | 0            | 0       | 0             | 0       |
| Suma                                   | 0           | 631     | 0            | 218     | 0             | 11      |
| Udział godzin w okresie obserwacji [%] | 0           | 28,6    | 0            | 9,9     | 0             | 0,5     |

Najgorsze warunki panowały w mieszkaniu nr 5, gdzie ze względu na przegrzewanie pomieszczenia mieszkalne znajdowały się poza III kategorią środowiska wewnętrznego przez znaczną część czasu (rys. 9.25, tabela 9.16). Był to lokal szczególnie narażony na wysokie temperatury ze względu na największe zyski bytowe i zachowanie użytkowników. W pokojach żaluzje stosowano rzadko, a okna pomiędzy zabudowaną loggią a kuchnią były stale zamknięte i również nie zasłaniane. Okna loggii i pokoi były otwierane w lecie, jednak osłonięcie przez szyb windy i lokalizacja okien po jednej stronie świata utrudniały naturalną wymianę powietrza i wietrzenie „na przestrzał”.



**Rys. 9.25.** Ocena komfortu cieplnego, mieszkanie nr 5, Lublin: a) czerwiec 2018, b) lipiec 2018, c) sierpień 2018.

**Tabela 9.16.** *Liczba godzin poza poszczególnymi kategoriami środowiska wewnętrznego, mieszkanie nr 5, Lublin.*

| Okres badań                            | I kategoria |      |         |   | II kategoria |      |         |   | III kategoria |      |         |   |
|----------------------------------------|-------------|------|---------|---|--------------|------|---------|---|---------------|------|---------|---|
|                                        | powyżej     |      | poniżej |   | powyżej      |      | poniżej |   | powyżej       |      | poniżej |   |
| 2018                                   | P1          | K    | P1      | K | P1           | K    | P1      | K | P1            | K    | P1      | K |
| VI                                     | 563         | 551  | 0       | 0 | 512          | 486  | 0       | 0 | 344           | 190  | 0       | 0 |
| VII                                    | 488         | 440  | 0       | 0 | 314          | 226  | 0       | 0 | 102           | 79   | 0       | 0 |
| VIII                                   | 621         | 609  | 0       | 0 | 577          | 575  | 0       | 0 | 302           | 237  | 0       | 0 |
| Suma                                   | 1672        | 1600 | 0       | 0 | 1403         | 1287 | 0       | 0 | 748           | 506  | 0       | 0 |
| Udział godzin w okresie obserwacji [%] | 75,7        | 72,5 | 0       | 0 | 63,5         | 58,3 | 0       | 0 | 33,9          | 22,9 | 0       | 0 |



## 10. Wnioski końcowe

Systemy szklarniowe wpływają w istotny sposób na bilans cieplny budynków mieszkalnych. Przeprowadzone badania potwierdziły, że możliwość skutecznego ich wykorzystania zależy w dużej mierze od decyzji projektowych dotyczących kształtowania obudowy i orientacji kolektora, jakim jest oszklona przestrzeń słoneczna. Wskazane jest, aby podejmowanie tych decyzji było wspomagane specjalistycznymi narzędziami projektowymi, uwzględniającymi szereg współzależności pomiędzy wymianą ciepła przez poszczególne elementy budynku. Do takich narzędzi zalicza się dynamiczne symulacje komputerowe, pozwalające na ocenę porównawczą wielu wariantów rozwiązań konstrukcyjnych lub materiałowych w tych samych warunkach klimatycznych. Aby taka ocena mogła być uznana za miarodajną, zalecane jest przeprowadzenie walidacji wykorzystywanego oprogramowania, umożliwiającej eliminację błędów i zwiększenie doświadczenia użytkownika.

Realizacja pracy umożliwiła sformułowanie ogólnych wniosków dotyczących funkcjonowania pasywnych systemów szklarniowych w budynkach wielorodzinnych, a także ustalenie bardziej szczegółowych zaleceń, umożliwiających jak najlepsze wykorzystanie potencjału przestrzeni słonecznej. Zostaną one przedstawione poniżej.

### 10.1. Kształtowanie przestrzeni słonecznej z uwagi na całoroczny bilans energetyczny

Spośród analizowanych czynników wpływających na działanie kolektora szklarniowego największe znaczenie miał rodzaj oszklenia i konstrukcja obudowy. Założenia dotyczące wpływu powłok spektralnie selektywnych (zastosowanych w obudowie szklarni) na zapotrzebowanie na energię w pomieszczeniach mieszkalnych okazały się trafne, potwierdzone zostały również możliwości kształtowania przy ich pomocy klimatu wewnętrznego w okresie letnim. Ocena całorocznego bilansu energetycznego umożliwiła wybór rozwiązań najbardziej korzystnych z punktu widzenia minimalizacji zapotrzebowania na ciepło i chłód, oraz pozwo-

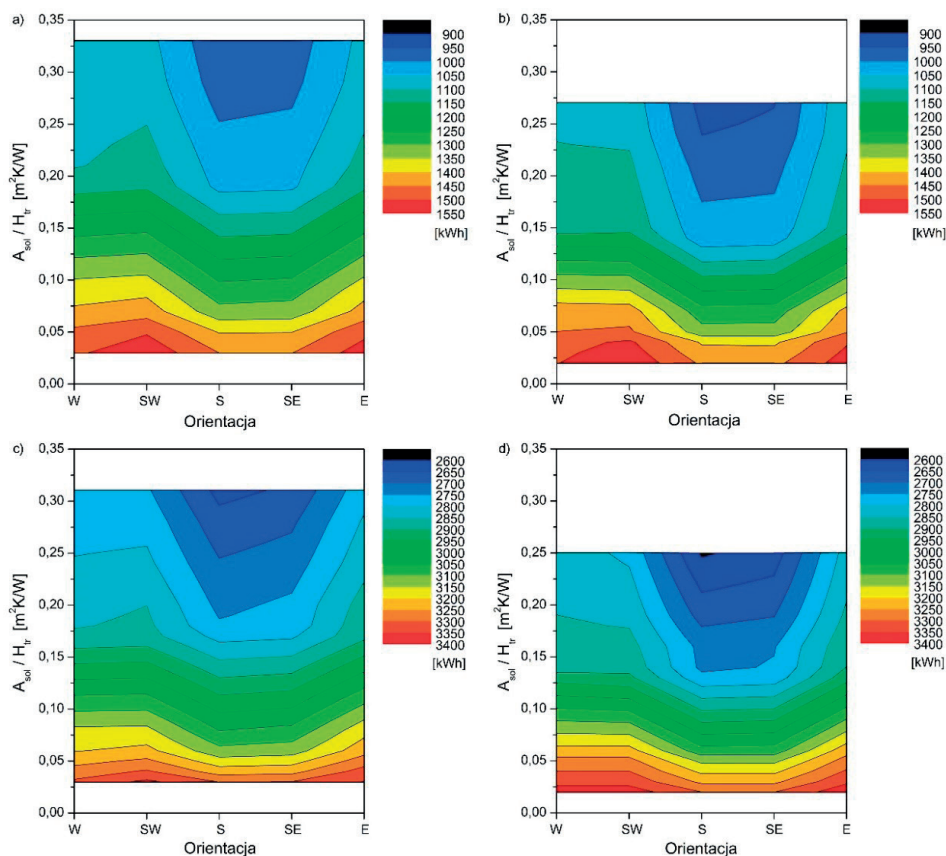
liła na ustalenie jakie korzyści można uzyskać dzięki systemom szklarniowym w polskim klimacie. Najważniejsze wnioski sformułowane na podstawie tej części badań są następujące:

- proporcja efektywnej powierzchni zbierającej oszklenia ( $A_{sol}$ ) i współczynnika strat ciepła przez przenikanie obudowy szklarni ( $H_{tr}$ ) jest parametrem przydatnym do podejmowania wstępnych decyzji projektowych dotyczących kształtowania przegród zewnętrznych kolektora szklarniowego; jest on silnie skorelowany z zapotrzebowaniem na ciepło w pomieszczeniu przyległym do przestrzeni słonecznej i w całym mieszkaniu, natomiast zależności między proporcją  $A_{sol}/H_{tr}$  a zapotrzebowaniem na chłód są nieco słabsze;
- właściwości fizyczne przegród zewnętrznych szklarni najbardziej pożądane w sezonie grzewczym to wysoka przepuszczalność promieniowania słonecznego połączona z wysoką izolacyjnością termiczną; z punktu widzenia zmniejszenia zapotrzebowania na ciepło w pomieszczeniach mieszkalnych najbardziej właściwa jest więc jak największa wartość  $A_{sol}/H_{tr}$ ;
- wymagania te w największym stopniu spełniają oszklenia podwójne z powłokami selektywnymi i izolowane przegrody pełne obudowy szklarni; preferowane są tutaj oszklenia o wysokiej przepuszczalności promieniowania słonecznego, nawet jeżeli mają mniejszą izolacyjność cieplną;
- zwiększenie wysokości oszkleń może być korzystne, przynosi jednak stosunkowo niewielkie zmiany zapotrzebowania na ciepło;
- w okresie chłodniczym najważniejsza jest możliwość zabezpieczenia przed promieniowaniem słonecznym i odprowadzenia ciepła na zewnątrz szklarni; wzrost proporcji  $A_{sol}/H_{tr}$  ma w tym przypadku odwrotny wpływ na zapotrzebowanie na energię niż w sezonie grzewczym;
- z punktu widzenia okresu letniego najlepszym rozwiązaniem są obudowy z oszkleniami jednoszybowymi i nieizolowanymi przegrodami pełnymi;
- zwiększenie wysokości oszklenia i jego powierzchni poprzez dodanie elementów przezroczystych na ścianach bocznych obudowy znacząco zwiększa obciążenie cieplne pomieszczeń mieszkalnych, a efekty takich działań są znacznie większe niż w przypadku zapotrzebowania na ciepło;
- całoroczne zapotrzebowanie na energię w pomieszczeniu sąsiadującym z balkonem może być zdominowane przez zapotrzebowanie na ciepło (co ma miejsce jeżeli zastosowane są obudowy nieizolowane z pojedynczymi oszkleniami) lub chłód (dla obudów izolowanych z oszkleniami podwójnymi);
- odnosząc się do całego mieszkania, sezon grzewczy jest jednak zdecydowanie okresem najbardziej energochłonnym; w związku z tym zalecenia pozwalające na minimalizację całkowitego zapotrzebowania na energię zasadniczo są zbieżne z rekomendacjami pozwalającymi ograniczyć zapotrzebowanie na ciepło;
- zalecane wielkości stosunku  $A_{sol}/H_{tr}$ , pozwalające ograniczyć całkowite zapotrzebowanie na energię, przedstawiono w tabeli 10.1;

**Tabela 10.1.** Zalecane proporcje  $A_{sol}/H_{tr}$  ze względu na minimalizację całkowitego zapotrzebowania na energię w ciągu roku.

| Lp. | Lokalizacja mieszkania | Rozmieszczenie oszklenia | $A_{sol}/H_{tr}$ [(m <sup>2</sup> ·K)/W] (zalecane oszklenie) |                        |
|-----|------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------|
|     |                        |                          | Pomieszczenie sąsiadujące z balkonem                          | Całość mieszkania      |
| 1.  | Mieszkanie środkowe    | 3 ściany obudowy         | 0,23 – 0,28<br>(O 2.3, ew. O 2.2)                             | 0,30 – 0,35<br>(O 2.1) |
| 2.  |                        | 1 ściana obudowy         | 0,19 – 0,24<br>(O 2.3, ew. O 2.2 lub 2.1)                     | 0,24 – 0,29<br>(O 2.1) |
| 3.  | Mieszkanie skrajne     | 3 ściany obudowy         | 0,28 – 0,33<br>(O 2.1)                                        | 0,28 – 0,33<br>(O 2.1) |
| 4.  |                        | 1 ściana obudowy         | 0,22 – 0,27<br>(O 2.1)                                        | 0,22 – 0,27<br>(O 2.1) |

- zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniach mieszkalnych osiąga minimum, jeżeli balkon skierowany jest na południe i południowy wschód;
- specyfiką orientacji południowej i południowo-wschodniej jest również fakt, że dla obudów z oszkleniami podwójnymi zastąpienie przegród przezroczystych na ścianach bocznych przegrodami pełnymi jest rozwiązaniem zmniejszającym zapotrzebowanie na ciepło;
- na podstawie danych klimatycznych Typowego Roku Meteorologicznego można stwierdzić, że odchylenie kolektora w kierunku zachodnim wpływa na zwiększenie zapotrzebowania na ciepło w większym stopniu niż w kierunku wschodnim, co wynika z asymetrii nasłonecznienia płaszczyzn pionowych skierowanych na wschód i zachód;
- wybór kierunku który pozwoliłby zminimalizować potrzeby chłodnicze nie jest jednoznaczny; wyniki wskazują na pewną przewagę orientacji południowej i zachodniej, ale ich zmienność jest dość duża w zależności od rodzaju obudowy i powierzchni oszklenia;
- całkowite zapotrzebowanie na energię wykazuje podobny charakter jak zapotrzebowanie na ciepło – rozkład wielkości jest asymetryczny względem południowej orientacji kolektora, a odchylenie w kierunku wschodnim jest bardziej korzystne niż w zachodnim (rys. 10.1).



**Rys. 10.1.** Całkowite zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu w zależności od orientacji balkonu, wysokość oszklenia 2,20 m: a) mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, b) mieszkanie w części środkowej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy, c) mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 3 ścianach obudowy, b) mieszkanie w części skrajnej budynku, oszklenie na 1 ścianie obudowy.

- wprowadzenie systemu szklarniowego daje największe efekty (w odniesieniu do mieszkania z balkonem otwartym) w mieszkaniach w środkowej części budynku; całkowite zapotrzebowanie na energię uległo tutaj redukcji średnio od 26,5% do 31,7% (jeżeli zastosowano obudowy z oszkleniami dwuszybowymi), i średnio do 10,1% (dla obudów z oszkleniami jednoszybowymi);
- w mieszkaniach w skrajnej części budynku zastosowanie szklarni zmniejszyło całoroczne zapotrzebowanie na energię średnio od 14,7% do 18,2% (oszklenia dwuszybowe) i średnio do 5,7% (oszklenia jednoszybowe);
- w przypadku zastosowania oszkleń jednoszybowych o małej przepuszczalności promieniowania słonecznego, obudowa balkonu może spowodować wzrost zapotrzebowania na energię, sięgający w analizowanych przykładach do 3,3%

(mieszkania w środkowej części budynku) i do 2,6% (mieszkania w skrajnej części budynku);

- średnia sprawność systemu szklarniowego podczas sezonu grzewczego (ustalona dla pomieszczenia sąsiadującego z balkonem) jest największa w mieszkaniach w części środkowej budynku; przy zastosowania obudów izolowanych z oszkleniami podwójnymi wynosi ona od 2,6% do 4,9%, a dla obudów nieizolowanych z oszkleniami pojedynczymi – do 2,1%;
- w mieszkaniach na kondygnacji najwyższej średnia sprawność systemów szklarniowych jest mniejsza – od 2,5% do 3,7% (obudowy izolowane z oszkleniami podwójnymi), i do 1,5% (obudowy nieizolowane z oszkleniami pojedynczymi); w ostatniej grupie w niektórych przypadkach sprawność jest ujemna, ponieważ obudowa balkonu powoduje wzrost zapotrzebowania na energię, ograniczając zyski słoneczne w pomieszczeniu mieszkalnym;
- dzięki wynikom symulacji, dla zadanej proporcji  $A_{sol}/H_{tr}$ , na podstawie odpowiednich krzywych regresji można oszacować zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniu po zabudowie balkonu, przy ustalonej lokalizacji mieszkania, rozmieszczeniu oszklenia i orientacji balkonu (znając zapotrzebowanie na ciepło pomieszczeniu sąsiadującym z balkonem w mieszkaniu bazowym z balkonem otwartym).

## 10.2. Możliwość przegrzewania pomieszczeń

Ocenę możliwości przegrzewania wykonano zgodnie z kryteriami „komfortu adaptacyjnego”. W tym celu posłużono się danymi klimatycznymi z 2015 roku, w którym odnotowano wyjątkowo długą falę upałów i wysokie temperatury w ciągu lata. Charakter tych danych jest nieco inny niż Typowych Lat Meteorologicznych (przygotowanych z wykorzystaniem miesięcy jak najbliższych średnim danym długookresowym), stąd możliwe są pewne różnice między wynikami dotyczącymi zapotrzebowania na chłód i przegrzewania. Analizy te miały być w założeniu jedynie poglądowe, stąd przeprowadzono je dla dwóch typów obudowy wybranych na podstawie badań symulacyjnych jako najbardziej i najmniej korzystne ze względu na całoroczne zapotrzebowanie na energię. Sprawdzenie, czy możliwe jest utrzymanie wewnętrznych warunków w pomieszczeniach mieszkalnych w wybranej kategorii środowiska wewnętrznego bez uruchamiania mechanicznego chłodzenia, pozwoliło wyciągnąć następujące wnioski:

- zastosowanie obudowy nieizolowanej, z oszkleniem o najniższej przepuszczalności promieniowania słonecznego minimalizującym zapotrzebowanie na chłód, nie powoduje problemów ze spełnieniem wymagań III kategorii środowiska wewnętrznego, niezależnie od powierzchni oszklenia i lokalizacji mieszkania;

- wymagania kategorii II także mogą być zachowane, ale z pewnymi ograniczeniami dotyczącymi orientacji balkonów – dla mieszkania na najwyższej kondygnacji preferowane są kierunki południowy i południowo-wschodni;
- obudowa izolowana z oszkleniem minimalizującym potrzeby grzewcze, ze względu na utrudnione odprowadzanie ciepła, znacznie zwiększa liczbę godzin o zbyt wysokiej temperaturze pomieszczeń;
- w mieszkaniu w części środkowej budynku wymagania kategorii III mogą być spełnione niezależnie od orientacji balkonu, ale tylko dla mniejszych wysokości oszklenia;
- utrzymanie temperatury w granicach przewidzianych dla II kategorii wymaga zastosowania oszklenia o najmniejszej wysokości i zaprojektowania balkonu o wystawie południowej lub południowo-wschodniej;
- w mieszkaniu na najwyższej kondygnacji przegrzewanie okazało się znacznie bardziej intensywne, a możliwości spełnienia wymagań kategorii III ograniczają się do najmniejszej wysokości oszklenia (w przypadku obudowy oszklonej na wszystkich ścianach) i orientacji balkonu południowo-wschodniej lub wschodniej.

Należy zwrócić uwagę, że symulacje wykorzystujące Typowy Rok Meteorologiczny wskazały kierunki południowo-wschodni i wschodni jako zdecydowanie niekorzystne z punktu widzenia zapotrzebowania na chłód. Biorąc pod uwagę możliwość przegrzewania, najdłuższe okresy wysokich temperatur występowały dla orientacji zachodniej balkonu, dla której zapotrzebowanie na chłód (na podstawie TRM) było jednym z niższych. Zdaniem autorki, jeżeli mieszkania nie są wyposażone w systemy mechanicznego chłodzenia, należy przyjąć zalecenia opracowane na podstawie rzeczywistych danych klimatycznych z lat, w których występowały długie fale upałów i ekstremalne temperatury powietrza zewnętrznego.

Przedstawione wyniki świadczą o możliwości znacznego wpływu na warunki panujące w pomieszczeniach mieszkalnych przy pomocy odpowiedniego doboru rodzaju obudowy i oszklenia, a także o możliwości takiego zaprojektowania kolektora szklarniowego, żeby zachowane były wymagania określonych kategorii środowiska wewnętrznego w ciągu lata.

### 10.3. Badania doświadczalne

Monitorowane mieszkania z systemami pasywnymi funkcjonowały w bardzo różnych warunkach środowiskowych – miały różną orientację względem stron świata, różny stopień zacielenia przez obiekty sąsiednie czy ekspozycję na działanie wiatru. Ich konstrukcja, stopień przeszklenia, właściwości optyczne i termiczne obudowy także nie były jednakowe, a przeprowadzone badania potwierdziły duże zróżnicowanie warunków termicznych w mieszkaniach, widoczne podczas sezonu grzewczego i poza nim.

Z jednej strony utrudniało to wyciągnięcie jednoznacznych wniosków dotyczących efektywności energetycznej przestrzeni słonecznych, a z drugiej – świadczyło o możliwości oddziaływania na warunki termiczne w lokalach poprzez odpowiednie zaprojektowanie obudowy i właściwy sposób użytkowania pomieszczeń. Należy też podkreślić, że we wszystkich mieszkaniach zaobserwowano zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło i wzrost temperatury w szklarni ponad temperaturę powietrza zewnętrznego.

Wyniki sugerują, że:

- najważniejsze czynniki wpływające na pozyskiwanie, konwersję i utylizację energii słonecznej to stopień szczelności obudowy balkonów oraz zachowania mieszkańców;
- zabudowa balkonów nie wpływa w odczuwalny sposób na pogorszenie warunków w pomieszczeniach podczas lata, pomimo zarejestrowanych okresów o temperaturze przekraczającej wymagania każdej z kategorii środowiska wewnętrznego.

Z przeprowadzonych wywiadów z użytkownikami wynikało jednoznacznie, że zabudowę balkonów oceniają oni pozytywnie. Jako zjawiska korzystne wymieniało odczuwalną poprawę warunków termicznych w mieszkaniach podczas zimy, osłonę przed wiatrem, możliwość wykorzystania dodatkowej przestrzeni czy zwiększone poczucie bezpieczeństwa. W subiektywnej ocenie mieszkańców, poza lokatorami mieszkania nr 5, warunki użytkowania pomieszczeń w okresie letnim były akceptowalne.

#### 10.4. Kierunki dalszych badań

Przeprowadzone analizy nie wyczerpały zagadnień związanych z funkcjonowaniem systemów szklarniowych w polskich warunkach klimatycznych. Możliwości kontynuacji i rozszerzenia badań dostrzegane przez autorkę są następujące:

- uwzględnienie zmienności parametrów dotyczących obudowy części mieszkalnej nie branych pod uwagę w badaniach, takich jak izolacyjność termiczna i pojemność cieplna przegród zewnętrznych, przepuszczalność promieniowania słonecznego przez okna, szczelność obudowy budynku i zróżnicowanie wymiany powietrza;
- przeprowadzenie pełnej analizy możliwości przegrzewania pomieszczeń dla pozostałych wariantów obudowy, co w niniejszej pracy zostało ograniczone ze względu na dość szeroki zakres innych badań;
- uwzględnienie innych sposobów użytkowania pomieszczeń, w tym pasywnych strategii ograniczenia przegrzewania dzięki wietrzeniu i zasłanianiu okien, a także zmiennych w czasie zysków bytowych;



- rozpatrzenie możliwości ograniczenia przegrzewania dzięki zastosowaniu innowacyjnych rozwiązań technicznych, takich jak oszklenia aktywne słonecznie o zmiennych w czasie parametrach optycznych, lub sterowane komputerowo inteligentne rolety, żaluzje, czy osłony zewnętrzne;
- sprawdzenie funkcjonowania systemów szklarniowych w innych strefach klimatycznych Polski.

Autorka widzi też potrzebę opracowania spójnych i ogólnie dostępnych danych klimatycznych z okresu letniego, pozwalających na ocenę ryzyka przegrzewania pomieszczeń w budynkach mieszkalnych.

## 10.5. Podsumowanie

Badania symulacyjne wykazały, że stosowanie systemów szklarniowych w budynkach wielorodzinnych może być skutecznym sposobem zmniejszenia zapotrzebowania na ciepło. Efektywność energetyczna zależy jednak w dużym stopniu od przyjętych charakterystyk obudowy przestrzeni słonecznej, decydujących o tym czy rozwiązanie będzie miało pozytywny wpływ na bilans energetyczny i czy będzie opłacalne podczas eksploatacji. Jednocześnie wykazano, że nawet w ekstremalnych warunkach letnich możliwe jest zachowanie komfortu użytkowania pomieszczeń pod warunkiem podjęcia właściwych decyzji na etapie projektowania budynku i przemysłanego użytkowania. Monitoring mieszkań także pozwolił zaobserwować pozytywny wpływ systemów pasywnych na komfort mieszkań, przede wszystkim dzięki podwyższeniu temperatury w obszarze szklarni w sezonie grzewczym. Można mieć nadzieję, że ze względu na atrakcyjność architektoniczną i użytkową oraz wymierne korzyści związane ze zmniejszeniem zapotrzebowania na energię, wraz z rozpowszechnieniem wiedzy na temat projektowania tego rodzaju systemów będą one zyskiwać coraz większą popularność.

## Bibliografia

1. Abdullah A.H, Meng Q., Zhao L., Wang F.: „Field study on indoor thermal environment in an atrium in tropical climates”, *Building and Environment*, 44 (2009) 431-436.
2. Achermann M., Zweifel G.: „RADTEST – Radiant Heating and Cooling Test Cases”, Report of Task 22, Subtask C, International Energy Agency, 2003.
3. Aelenei D., de Azevedo Leal H., Aelenei L.: „The use of attached sunspaces in retrofitting design: the case of residential buildings in Portugal”, *Energy Procedia*, 48 (2014) 1436-1441.
4. Albatici R., Passerini F., Pfafferott J.: „Energy performance of verandas in the building retrofit process”, *Energies*, 9 (2016) 365-376.
5. Albatici R., Passerini F.: „Analysis of the energy performance of sunspaces: a new method”, *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International ISES Europe Solar Congress, EuroSun 2010, Graz 2010*.
6. Amoako-Attah J., B-Jahromi A.: „Impact of conservatory as a passive solar design of UK dwellings”, *Proceedings of the Institute of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 169 (2016) 198-213.
7. Amoako-Attah J.: „Impact of climate change on newly detached residential buildings in the UK passive mitigation and adaptation strategies”, *School of Computing and Technology, University of West London, London 2015*.
8. Anderson B.: „Passive solar design handbook”, Van Nostrand Reinhold Company, 1985.
9. Asdrubali F., Cotana F., Massineo A.: „On the evaluation of solar greenhouse efficiency in building simulation during the heating period”, *Energies*, 5 (2012) 1864-1880.
10. ASHRAE Guideline 14-2002: „Measurement of energy and demand savings”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta 2002. Dostęp na: [http://www.eepperformance.org/uploads/8/6/5/0/8650231/ashrae\\_guideline\\_14-2002\\_measure-ment\\_of\\_energy\\_and\\_demand\\_saving.pdf](http://www.eepperformance.org/uploads/8/6/5/0/8650231/ashrae_guideline_14-2002_measure-ment_of_energy_and_demand_saving.pdf), data dostępu: 11 IV 2019.
11. „ASHRAE Handbook – Fundamentals”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta 2009.

12. ASHRAE Standard 140-2001: „Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta 2001.
13. Athienitis A.K., Santamouris M.: „Thermal analysis and design of passive solar buildings”, James and James Ltd, London 2002.
14. Baborska-Narozny M., Stevenson F., Chatterton P.: „Temperature in housing: stratification and contextual factors”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 169 (2016) 125-137.
15. Baborska-Narozny M., Grudzińska M.: „Overheating in a UK high-rise retrofit apartment block – ranking of measures available to case study occupants based on modelling”, *Energy Procedia*, 111 (2017) 568-577.
16. Baborska-Narozny M., Stevenson F., Grudzińska M.: „Overheating in retro-fitted flats: occupant practices, learning and interventions”, *Building Research and Information*, 45 (2017) 40-59.
17. Bajars K., Persson A.: „Study of glazed spaces as a renovation strategy for two typical residential multi-apartment buildings from Swedish Million Programme”, Lund University, Lund 2017.
18. Balcomb J.D. (red.): „Passive solar buildings”, The Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, Massachusetts 1992.
19. Balcomb J.D., Barley C.D., McFarland R.D., Perry J.E., Wray W.O., Nell S.: „Passive Solar Design Handbook. Vol. II: Passive Solar Design Analysis”, US Department of Energy, report DOE/CS-0127/2 1980.
20. Balcomb J.D., Jones R.W., McFarland R.D., Wray O.W.: „Passive solar heating analysis. A design manual”, Los Alamos National Laboratory, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta 1984.
21. Balcomb J.D.: „Design tools for passive solar applications”, *Proceedings of the Annual Meeting and Annual Passive Conference*, Boulder, Colorado 1986.
22. Bataineh K.M., Fayez N.: „Analysis performance of building attached sun-space”, *Energy and Buildings*, 43 (2011) 1863-1868.
23. Beausoleil-Morrison I. (red.): „Experimental and simulation-based investigation of the performance of small-scale fuel cell and combustion-based co-generation devices serving residential buildings”, IEA Annex 41 Final Report, International Energy Agency, 2008.
24. Beausoleil-Morrison I., Ferguson A. (red.): „Inter-model comparative testing and empirical validation of Annex 42 models for residential cogeneration devices”, IEA Annex 41, Subtask B Report, International Energy Agency, 2007.
25. Beizaee A., Lomas K.J., Firth S.K.: „National survey of summertime temperatures and overheating risk in English homes”, *Building and Environment*, 65 (2013) 1-17.
26. Ben-Nakhi A.E., Aasem E.O.: „Development and integration of a user friendly validation module within whole building dynamic simulation”, *Energy Conversion and Management*, 44 (2003) 53-64.

27. Blasco Lucas I., Hoese L., Pontoriero D.: „Experimental study of passive systems thermal performance”, *Renewable Energy*, 19 (2000) 39-45.
28. Bloomfield D.: „Design tool evaluation exercise – technical report”, International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, Task 8, 1988.
29. Boonstra C.: „Glazed balconies in building renovation”, James and James Ltd, London 1997.
30. Bourdeau L., Buscarlet C. (red.): „PASSYS, development of simplified design tools”, Research Report of the Subgroup Simplified Design Tools, EUR 15117 EN, Commission of the European Communities, Directorate General XII, Brussels 1993.
31. „Buildings and Climate Change Status, Challenges and Opportunities”, United Nations Environment Programme 2007. Dostęp na: [www.unep.org](http://www.unep.org), data dostępu: 31 X 2016.
32. Bülow-Hübe H.: „Energy-efficient window systems. Effects on energy use and daylight in buildings”, Lund University, Lund 2001.
33. Calumen II v. 1.3.1, Saint Gobain Glass. Dostęp na: <https://calumen-ii2.software.informer.com/1.3/>, data dostępu: 7 II 2015.
34. Cardinale N., Ruggiero F.: „Energetic aspects of bioclimatic buildings in the Mediterranean area: a comparison between two different computation methods”, *Energy and Buildings*, 31 (2000) 55-63.
35. Celadyn W.: „Przegrody przeszklone w architekturze energooszczędnej”, Politechnika Krakowska, Kraków 2004.
36. Chan Y., Tzempelikos A.: „A hybrid ray-tracing and radiosity method for calculating radiation transport and illuminance distribution in spaces with venetian blinds”, *Solar Energy*, 86 (2012) 3109-3124.
37. Chiesa G., Simonetti M., Ballada G.: „Potential of attached sunspaces in winter season comparing different technological choices in Central and Southern Europe”, *Energy and Buildings*, 138 (2017) 377-395.
38. Chow D., Levermore G.J.: „The effects of future climate change on heating and cooling demands in office buildings in the UK”, *Building Services Engineering Research and Technology*, 31 (2010) 307-323.
39. Chwieduk D.: „Energetyka słoneczna budynku”, Arkady, Warszawa 2011.
40. Chwieduk D.: „Solar energy in buildings: thermal balance for efficient heating and cooling”, Academic Press, Amsterdam 2014.
41. Clarke J.A., Strachan P.A., Pernot C.: „An approach to the calibration of building energy simulation models”, *ASHRAE Transactions*, 99 (1993) 917-927.
42. Clarke J.A.: „Energy simulation in building design”, Butterworth-Heinemann, Oxford 2001.
43. „Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Buildings: Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, Intergovernmental Panel on Climate

- Change, Cambridge University Press, New York 2014. Dostęp na: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch), data dostępu: 31 X 2016.
44. "Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva 2014. Dostęp na <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr>, data dostępu: 13 VII 2018.
  45. Coakley D., Raftery P., Keane M.: „A review of methods to match building energy simulation models to measured data”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37 (2014) 123-141.
  46. Coley D., Kershaw T., Eames M.: „A comparison of structural and behavioural adaptations to future proofing buildings against higher temperatures”, *Building and Environment*, 55 (2012) 159-166.
  47. Collins L., Natarajan S., Levermore G.: „Climate change and future energy consumption in UK housing stock”, *Building Services Engineering Research and Technology*, 31 (2010) 75-90.
  48. Colombo R., Landabaso A., Sevilla A.: „Passive solar architecture for Mediterranean area”, Joint Research Center, Commissions of the European Communities, Brussels 1994.
  49. Cooper I., Macmillan S.: „Exploiting sunshine in house design”, Building Research Establishment, London 1988.
  50. Cropper P., Porritt S., Shao L., Goodier C.: „Ranking of interventions to reduce dwelling overheating during heat waves”, *Energy and Buildings*, 55 (2012) 16-27.
  51. Cucumo M., Kaliakatsos D., Marinelli V.: „Estimating effective solar absorptance in rooms”, *Energy and Buildings*, 23 (1995) 117-120.
  52. Currie J.I.: „Sunspace augmented positive input ventilation of buildings”, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International ISES Europe Solar Congress, EuroSun 2006, Glasgow 2006.
  53. Dalenbäck J.O.: „Solar energy in building renovation”, *Energy and Buildings*, 24 (1996) 39-50.
  54. Dawdo Cz., Sarosiek W., Rudczyk-Malijewska E.: „Badania nad zmniejszeniem energochłonności eksploatacyjnej budynku poprzez zabudowę i termorenowację loggii”, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1991.
  55. Della-Marta P.M., Luterbacher J., von Weissenfluh H., Xoplaki E., Brunet M., Wanner H.: „Summer heat waves over western Europe 1880-2003, their relationship to large-scale forcings and predictability”, *Climate Dynamics*, 29 (2007) 251-275.
  56. „Design Summer Years for London. CIBSE TM49”, Chartered Institution of Building Services Engineers, London 2014.
  57. „DesignBuilder v4.5 - EN 15265/ISO 13790 Validation Report”. Dostęp na: [www.designbuilderitalia.it/wp-content/uploads/2015/05/Designbuilder-v4-5\\_EN-15265\\_ISO-13790-Validation-Report.pdf](http://www.designbuilderitalia.it/wp-content/uploads/2015/05/Designbuilder-v4-5_EN-15265_ISO-13790-Validation-Report.pdf), data dostępu: 19 V 2017.

58. DIN V 18599-2:2007 „Energy efficiency of buildings. Calculation of the energy needs, delivered energy and primary energy for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting. Part 2: Energy needs for heating and cooling of building zones”, German Institute for Standardisation, Berlin 2007.
59. Dobek M., Nowosad M., Wereski S.: „Biotermiczno-meteorologiczna charakterystyka pogody w okolicy Lublina w okresie 1976-2010”, *Annales Universitatis Mariae Curie- Skłodowska*, 70 (2015) 83-94.
60. Dubois M.C.: „Solar-protective glazing for cold climates. A parametric study of energy use in offices”, Lund University, Lund 1998.
61. Duffie J.A., Beckmann W.A.: „Solar Engineering of Thermal Processes”, John Wiley and Sons Inc., New Jersey 2013.
62. „Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków”, *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* L153/13 z 18.06.2010.
63. Elias-Özkan S.T., Summers F., Taner Ö.: „Energy efficiency of buildings with a solar space: two case studies from the Anatolian plateau”, *Proceedings of the PLEA 2009 – the 26<sup>th</sup> Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Quebec City 2009.
64. „Environmental design. CIBSE Guide A”, Chartered Institution of Building Services Engineers, London 2006.
65. Erbs D.G., Klein S.A., Duffie J.A.: „Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily, and monthly-average global radiation”, *Solar Energy*, 28 (1982) 293-302.
66. Erkoreka A., Gorse C., Fletcher M., Martin K.: „Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements. Report of Subtask 2: Logic and use of the Decision Tree for optimizing full scale dynamic testing”, International Energy Agency, 2016.
67. Fabrizio E., Monetti V.: „Methodologies and advancements in the calibration of building energy models”, *Energies*, 8 (2015) 2548-2574.
68. Fanger P.O., Valbjorn O. (red.): „Indoor climate”, Danish Building Research, Copenhagen 1979.
69. Felsmann C.: „Mechanical equipment and control strategies for a chilled water and a hot water system”, Report for the International Energy Agency's SHC Task34/ECBCS Annex 43 Subtask D, International Energy Agency, 2008.
70. Fernandez-Gonzalez A.: „Analysis of the thermal performance and comfort conditions produced by five different passive solar heating strategies in the United States midwest”, *Solar Energy*, 81 (2007) 581-593.
71. Frantz J., Hanke S., Krampen M., Schempp D.: „Ogród zimowy. Bliżej natury: przykłady projektów architektonicznych i rozmieszczenia roślin”, Arkady, Warszawa 2000.
72. Fredlund B.: „A design tool for glazed spaces. Part II: Examples”, *ASHRAE Transactions* 101 (1995) 1272-1286.

73. Gawin D., Kossecka E. (red.): „Typowy rok meteorologiczny do symulacji wymiany ciepła i masy w budynkach”, Politechnika Łódzka, Łódź 2002.
74. Glassner A.S.: „An introduction to ray tracing”, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco 2002.
75. Gogół W. (red.): „Konwersja termiczna energii promieniowania słonecznego w warunkach krajowych”, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.
76. Gram-Hanssen K.: „Residential heat comfort practices: understanding users”, *Building Research and Information*, 38 (2010), 175-186.
77. Grau K., Johnsen K.: „General shading model for solar building design”, *ASHRAE Transactions* 101 (1995) 1298-1310.
78. Grudzińska M., Jakusik E.: „Energy performance of buildings in Poland on the basis of different climatic data”, *Indoor and Built Environment*, 26 (2017) 551-566.
79. Grudzińska M., Jakusik E.: „The efficiency of a typical meteorological year and actual climatic data in the analysis of energy demand in buildings”, *Building Services Engineering Research and Technology*, 36 (2015) 658-669.
80. Grudzińska M.: „Balkony oszklone jako systemy szklarniowe – kształt balkonu a zyski energetyczne (cz. III)”, *Izolacje*, 10 (2014) 22-26.
81. Grudzińska M.: „Balkony oszklone jako systemy szklarniowe – wpływ powierzchni oszklwienia na zyski energetyczne (cz. II)”, *Izolacje*, 9 (2014) 50-55.
82. Grudzińska M.: „Balkony oszklone jako systemy szklarniowe – wpływ rodzaju oszklwienia na zapotrzebowanie na energię (cz. IV)”, *Izolacje*, 3 (2015) 49-55.
83. Grudzińska M.: „Balkony oszklone jako systemy szklarniowe – zasady konstrukcji i funkcjonowania (cz. I)”, *Izolacje*, 7/8 (2014) 36-41.
84. Grudzińska M.: „Czynniki wpływające na efektywność energetyczną obudowy balkonu”, *Czasopismo Techniczne, Budownictwo 2-B*, 3 (2012) 149-157.
85. Grudzińska M.: „Dobór oszklwienia w pasywnych systemach szklarniowych na przykładzie oszklwionego balkonu”, *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury*, 3 (2016) 105-112.
86. Grudzińska M.: „Efektywność energetyczna lokali mieszkalnych z oszklwionymi balkonami w polskich warunkach klimatycznych”, *Materiały Budowlane*, 8 (2015) 56-59.
87. Grudzińska M.: „Glazed balconies as passive greenhouse systems – potential of their use in Poland”, *Building Services Engineering Research and Technology*, 37 (2016) 555- 572.
88. Grudzińska M.: „Oszklone balkony i ich wpływ na zapotrzebowanie na energię w pomieszczeniach mieszkalnych”, monografia „Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce”, s. 41-46, Łódź 2013.
89. Gueymard C.A.: „An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms”, *Solar Energy*, 38 (1987) 367-386.



90. Gupta R., Gregg M.: „Using UK climate change projections to adapt existing English homes for a warming climate”, *Building and Environment*, 55 (2012) 20-42.
91. Gupta R., Tiwari G.N.: „Effect of latitude on weighted solar fraction of north partition wall for various shapes of solarium”, *Building and Environment*, 39 (2004) 547-556.
92. Hacker J., Belcher S., White A.: „Design Summer Years for London. CIBSE TM 49”, Chartered Institution of Building Services Engineers, London 2014.
93. Haller A., Schweizer E. (red.): „Solar renovation concepts and systems”, International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, A Report of Task 20 Subtask F, 1999.
94. Hastings R., Wall M. (red.): „Sustainable solar housing. Volume 1: Strategies and solutions”, Earthscan, London 2007.
95. Hastings R., Wall M. (red.): „Sustainable solar housing. Volume 2: Exemplary buildings and technologies”, Earthscan, London 2007.
96. Hay, J.E.: „Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces”, *Solar Energy*, 23 (1979) 301-307.
97. Hestnes A.G., Hastings S.R., Saxhof B.: „Solar energy houses: strategies, technologies, examples”, James and James Science Publishers Ltd, London 1996.
98. Hilliaho K., Köliö A., Pakkala T., Lahdensivu J., Vinha J.: „Effects of added glazing on balcony indoor temperatures: field measurements”, *Energy and Buildings*, 128 (2016) 458-472.
99. Hilliaho K., Lahdensivu J., Vinha J.: „Glazed space thermal simulation with IDA-ICE 4.61 software – suitability analysis with case study”, *Energy and Buildings*, 89 (2015) 132-141.
100. Hilliaho K., Mäkitalo E., Lahdensivu J.: „Energy saving potential of glazed space: sensitivity analysis”, *Energy and Buildings*, 99 (2015) 87-97.
101. Hilliaho K.: „Energy saving potential and interior temperatures of glazed spaces. Evaluation through measurements and simulations”, Tampere University of Technology, Tampere 2017.
102. Holm A.: „Final report Annex 41. Whole building heat, air and moisture response (MOIST-EN). Volume 4: Applications: indoor environment, energy, durability”, IEA Annex 41, Subtask 3, International Energy Agency, 2008.
103. Holtz M.J. (red.): „Passive solar handbook. Introduction to passive solar concepts”, Architectural Energy Corporation, Boulder, Colorado. Dostęp na: <http://onebuilding.org>, data dostępu: 08 II 2019.
104. Holtz M.J.: „Passive and hybrid solar low energy buildings. Design guidelines: an international summary”, International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, Task 8, Design information booklet no. 3, 1990.
105. Horvat I., Dović D.: „Dynamic method for calculating energy need in HVAC systems”, *Transactions of FAMENA*, 1 (2016) 47-62.

106. Hottel H.C., Woertz B.B.: „Performance of flat plate solar collectors”, Transactions of ASME, 64 (1942) 91-104.
107. [http://mib.gov.pl/2-Wskazniki\\_emisji\\_wartosci\\_opalowe\\_paliwa.htm](http://mib.gov.pl/2-Wskazniki_emisji_wartosci_opalowe_paliwa.htm), data dostępu: 16 IX 2017.
108. <http://sbi.dk/bsim/Pages/Update-history.aspx>, data dostępu: 09 VIII 2017.
109. Huebner G.M., Cooper J., Jones K.: „Domestic energy consumption – what role do comfort, habit, and knowledge about the heating system play?”, Energy and Buildings, 66 (2013) 626-636.
110. Hulme M., Jenkins G.J., Lu X., Turnpenny J.R., Mitchell T.D., Jones R.G., Lowe J., Murphy J.M., Hassell D., Boorman P., McDonald R., Hill S. (red.): „Climate change scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 scientific report”, Tyndall Centre for Climate Change Research, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich 2002.
111. Humphreys M. A., Nicol J. F. „Understanding the adaptive approach to thermal comfort”, ASHRAE Transactions 104 (1998) 991-1004.
112. Ignjatović D., Jovanović Popović M., Kavran J.: „Application of sunspaces in fostering energy efficiency and economical viability of residential buildings in Serbia”, Energy and Buildings, 98 (2015) 3-9.
113. “International performance measurement and verification protocol: concepts and options for determining energy and water savings”, vol. I, International Performance Measurement and Verification Protocol Committee, 2002. Dostęp na: <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31505.pdf>, data dostępu: 11 IV 2019.
114. „Investigation into overheating in homes. Analysis of gaps and recommendations”, Department for Communities and Local Government, London 2012.
115. „Investigation into overheating in homes. Literature review”, Department for Communities and Local Government, London 2012.
116. ISO/FDIS 13790:2006(E) „Energy performance of buildings. Calculation of energy use for space heating and cooling”, Draft for comments by CEN and ISO WG. Dostęp na: [http://www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set3/WI\\_14\\_TC-draft-ISO13790\\_2006-07-10.pdf](http://www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set3/WI_14_TC-draft-ISO13790_2006-07-10.pdf), data dostępu: 23 II 2017.
117. Janssens A.: „Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements. Report of Subtask 1a: Inventory of full scale test facilities for evaluation of building energy performances”, International Energy Agency, 2016.
118. Janssens A.: „Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements. Report of Subtask 1b: Overview of methods to analyse dynamic data”, International Energy Agency, 2016.
119. Jensen S.Ø. (red.): „The PASSYS project: Phase 1: Final report of the Subgroup Model Validation and Development: Final Report 1986-1989”, EUR 13034 EN, Commission of the European Communities, Directorate General XII for Science, Research and Development, Brussels 1990.

120. Jensen S.Ø. (red.): „Validation of building energy simulation programs. Research report PASSYS Subgroup Model Validation and Development”, EUR 15115 EN, Commission of the European Communities, Directorate General XII for Science, Research and Development, Brussels 1993.
121. Jensen S.Ø.: „Empirical whole model validation case study: the PASSYS reference wall”, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> IBPSA International Conference, Adelaide 1993.
122. Jensen S.Ø.: „Validation of building energy simulation programs: a methodology”, *Energy and Buildings*, 22 (1995) 133-144.
123. Jiménez M.J.: „Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements. Report of Subtask 3.1: Thermal performance characterization based on full scale testing - description of the common exercises and physical guidelines”, International Energy Agency, 2016.
124. Jokisalo J., Kurnitski J.: „Performance of EN ISO 13790 utilisation factor heat demand calculation method in a cold climate”, *Energy and Buildings*, 39 (2007) 236-247.
125. Joncich, D.M.: „Overview of passive solar design techniques”, Construction Engineering Research Laboratory, Illinois 1982.
126. Jones R.W., Balcomb J.D., Kosiewicz C.E., Lazarus G.S., McFarland R.D., Wray W.O.: „Passive solar design handbook. Vol. III: Passive solar design analysis”, US Department of Energy, report DOE/CS-0127/3, 1982.
127. Jones R.W., McFarland R.D.: „The sunspace primer. A guide for passive solar heating”, Van Nostrand Reinhold Company, New York 1984.
128. Jørgensen O.: „Analysis model survey”, International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, Task 8, Report no 143, 1983.
129. Jørgensen O.B., Hendriksen O.J.: „Glazed balconies and sunspaces - energy savers or energy wasters?”, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International ISES Europe Solar Congress, EuroSun 2000, Copenhagen 2000.
130. Jørgensen O.B., Nielsen L.T.: „Monitored results from an innovative solar renovation of multi storey housing - EU SHINE - Engelsby, Flensburg”, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International ISES Europe Solar Congress, EuroSun 2000, Copenhagen 2000.
131. Judkoff R., Neymark J.: „Building energy simulation test (BESTEST) and diagnostic method”, International Energy Agency, Report NREL/TP-472-6231, 1995.
132. Judkoff R., Wortman D., Burch J.: „Empirical validation of building energy analysis simulation programs: A status report”, Proceedings of the DOE Passive and Hybrid Solar Energy Update, Washington D.C. 1982.
133. Judkoff R., Wortman D., Burch J.: „Empirical validation using data from the SERI Class-A validation house”, Proceedings of ASES Annual Meeting, Minneapolis, Minnesota 1983.

134. Judkoff R., Wortman D., Christensen C., O'Doherty B., Simms D., Hannifan M.: „A comparative study of four passive building energy simulations: Doe-2.1, Blast, Suncat-2.4, Derob-III”, Proceedings of ISES Passive Solar Conference, Amherst, Massachusetts 1980.
135. Judkoff R., Wortman D., O'Doherty B., Burch J.: „A methodology for validating building energy analysis simulations”, National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-550-42059, 2008.
136. Judkoff R.: „EBC Annex 43: Testing and validation of building energy simulation tools systems. Project summary report”, Energy in Buildings and Communities Programme, 2013.
137. Judkoff R.: „Validation of building energy analysis simulation programs at the Solar Energy Research Institute”, Energy and Buildings, 10 (1988) 221-239.
138. Kalyanova O., Heiselberg P.: „Empirical validation of building simulation software: modelling of double facades. Final report”, Technical Report IEA ECBCS Annex 43/SHC Task 34 Subtask E, International Energy Agency, Aalborg University, 2009.
139. Kelly N., Beausoleil-Morrison I. (red.): „Specifications for modelling fuel cell and combustion-based residential cogeneration devices within whole-building simulation programs”, IEA Annex 41, Subtask B Report, International Energy Agency, 2007.
140. Kersken M.C., Heusler I., Strachan P.: „Full scale empirical validation for building energy simulation programs”, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on System Simulation in Buildings, Liege 2014.
141. Kisilewicz T., Nowak K.: „Wpływ oszklonej strefy buforowej na bilans cieplny budynku”, Czasopismo Techniczne, 5-B/2006, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
142. Kisilewicz T.: „Model symulacyjny wymiarowania termicznego biernych systemów słonecznych”, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Łądowej, Kraków 1988.
143. Kisilewicz T.: „Pojemność cieplna a komfort termiczny w budynkach energooszczędnych”, Materiały Budowlane, 9 (2014) 51-55.
144. Kisilewicz T.: „Wpływ izolacyjnych, dynamicznych i spektralnych właściwości cieplnych przegród na bilans cieplny budynków energooszczędnych” Politechnika Krakowska, Seria Inżynieria Łądowa, Monografia nr 364, Kraków 2008.
145. Kisilewicz T.: „Zasady kształtowania budynków pasywnych”, Fizyka budowli w teorii i praktyce, Materiały konferencyjne X polskiej konferencji naukowo-technicznej, Łódź 2005.
146. Klucher, T.M.: „Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces”. Solar Energy, 23 (1979) 111-114.
147. Kok H., Andrews S.: „Passive and hybrid solar low energy buildings. Design and construction issues”, International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, Task 8, Design information booklet no. 5, 1989.

148. Kok H., Holtz M.J. (red.): „Passive and hybrid solar low energy buildings. Passive solar homes: case studies”, International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, Task VIII, Design information booklet no. 6, 1990.
149. Kokogiannakis G., Strachan P., Clarke J.: „Comparison of the simplified methods of the ISO 13790 standard and detailed modelling programs in a regulatory context”, *Journal of Building Performance Simulation*, 1 (2008) 209-219.
150. Kotarska K., Kotarski Z.: „Ogrzewanie energią słoneczną. Systemy pasywne”, NOT-SIGMA, Warszawa 1989.
151. Kottke M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F.: „World map of the Köppen-Geiger climate classification updated”, *Meteorologische Zeitschrift*, 15 (2006) 259-263.
152. „Krajowy plan działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych”, Minister Gospodarki, Warszawa 2010.
153. „Krajowy plan mający na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii”, Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju, Monitor Polski z 2015 r. poz. 614, Warszawa 2015.
154. Krasoń J., Lichołai L.: “Thermal efficiency of a modified thermal storage wall containing phase change material in comparative test periods”, *E3S Web of Conferences*, 49 (2018) 00059.
155. Krzyżewska A., Bartoszek K., Wereski S.: „Warunki meteorologiczne w Lublinie podczas wyjątkowo uciążliwej fali upałów z sierpnia 2015 r.”, *Przegląd Geofizyczny*, 3-4 (2016) 239-249.
156. Krzyżewska A.: „Szczególnie uciążliwe fale upałów w Lublinie”, *Przegląd Geofizyczny*, 3-4 (2015) 207-215.
157. Kumaran K., Sanders C.: „Volume 3: Boundary conditions and whole building HAM analysis”, IEA Annex 41, Subtask 3, International Energy Agency, 2008.
158. La Gennusa M., Nucara A., Pietrafesa M., Rizzo G.: „A model for managing and evaluating solar radiation for indoor thermal comfort”, *Solar Energy*, 81 (2007) 594-606.
159. Laskowski L.: „Badania zużycia ciepła i efektywności biernego wykorzystania energii słonecznej do ogrzewania eksperymentalnego budynku jednorodzinnego”, Praca naukowo-badawcza NF-71, ITB, Warszawa 1985.
160. Laskowski L.: „Jakość ochrony cieplnej pomieszczeń mieszkalnych w porze letniej”, *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, 1 (2005) 239-248.
161. Laskowski L.: „Kompedium podstaw budownictwa energoefektywnego z elementami ekoprojektowania”, Polcen, Warszawa 2017.
162. Laskowski L.: „Ochrona cieplna i charakterystyka energetyczna budynku”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
163. Laskowski L.: „Ogrzewnictwo. Część II: Projektowanie systemów biernego ogrzewania słonecznego w energooszczędnych budynkach”, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1992.

164. Laskowski L.: „Systemy biernego ogrzewania słonecznego. Zagadnienia funkcjonowania i efektywności energetycznej”, Polska Akademia Nauk, Studia z Zakresu Inżynierii, Warszawa 1993.
165. LEARN project, Department of Architecture and Spatial Design, London Metropolitan University. Dostęp na: [http://new-learn.info/packages/cdres/projects/p13/en/t5/t\\_6.html](http://new-learn.info/packages/cdres/projects/p13/en/t5/t_6.html), data dostępu: 14 IX 2017.
166. Leenknecht S., Saelens D.: „Comparison between simplified and dynamic calculation of highly glazed spaces”, Proceedings of the 1<sup>st</sup> Central European Symposium on Building Physics, Cracow – Lodz 2010.
167. Licholai L., Krasoń J., Miąsik P., Starakiewicz A.: „Udział materiału zmienno-fazowego w pracy energetycznej przegrody kolektorowo-akumulacyjnej w przejściowych warunkach klimatycznych”, Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, 34 (2017) 495-504.
168. Licholai L., Starakiewicz A., Krasoń J., Miąsik P.: „Wpływ konfiguracyjnych rozwiązań warstwy przeszklenia na energetyczne funkcjonowanie zmodyfikowanej przegrody kolektorowo – akumulacyjnej”, Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, 2 (2018) 19-24.
169. Licholai L.: „Analiza funkcjonowania pasywnych systemów ogrzewania słonecznego i prognozowanie ich efektywności energetycznej”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2000.
170. Liu B.H.Y., Jordan R.C.: „The long term average performance of flat-plate solar-energy collectors”, Solar Energy, 7 (1963) 53-74.
171. Lomas K.J., Eppel H., Martin C.J., Bloomfield D.P.: „Empirical validation of building energy simulation programs using test room data. Volume 1: Final Report”, International Energy Agency, 1994.
172. Lomas K.J., Eppel H., Martin C.J., Bloomfield D.P.: „Empirical validation of building energy simulation programs”, Energy and Buildings 26 (1997) 253-275.
173. Lomas K.J., Eppel H., Martin C.J., Watson M., Bloomfield D.P.: „Empirical validation of building energy simulation programs using test room data. Volume 2: Empirical validation package”, International Energy Agency, 1994.
174. Lomas K.J., Kane T.: „Summertime temperatures and thermal comfort in UK homes”, Building Research and Information, 41 (2013) 259-280.
175. Lomas K.J.: „Empirical validation of building energy simulation programs using test room data. Volume 3: Working reports”, International Energy Agency, 1994.
176. Loutzenhisser P., Manz H., Maxwell H.: „Empirical validations of shading/daylighting/load interactions in building energy simulation tools”, Report for the International Energy Agency’s SHC Task 34/ECBCS Annex 43 Project C, International Energy Agency, 2007.
177. Lund H.: „Revised splitting procedure for calculation of direct normal radiation and diffuse radiation”. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby 1979.



178. MacDonald I., Clarke J.A., Strachan P.: „Assessing uncertainty in building simulation”, Proceedings of the 6<sup>th</sup> IBPSA Building Simulation Conference, Kyoto 1999.
179. MacDonald I., Strachan P.: „Practical application of uncertainty analysis”, *Energy and Buildings*, 33 (2001) 219-227.
180. MacDonald I.: „Quantifying the effects of uncertainty in building simulation”, Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, 2002.
181. Madsen H., Bacher P., Bauwens G., Deconinck A.H., Reynders G., Roels S., Himpe E., Lethé G.: „Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements. Report of Subtask 3.2: Thermal performance characterisation using time series data – statistical guidelines”, International Energy Agency, 2016.
182. Manz H., Loutzenhiser P., Frank T., Strachan P.A., Bundi R., Maxwell G.: „Series of experiments for empirical validation of solar gain modeling in building energy simulation codes – experimental setup, test cell characterization, specifications and uncertainty analysis”, *Building and Environment*, 41 (2006) 1784-1797.
183. Maxwell G., Loutzenhiser P., Klaassen C.: „Daylighting – HVAC interaction tests for the empirical validation of building energy analysis tools”, Report of Task 22, Subtask D, International Energy Agency, 2004.
184. Maxwell G., Loutzenhiser P., Klaassen C.: „Economizer control tests for the empirical validation of building energy analysis tools”, Report of Task 22, Subtask D, International Energy Agency, 2004.
185. Mazria E.: „The passive solar energy book”, Rodale Press Inc., Emmaus 1979.
186. McNeil A., Jonsson C.J., Appelfeld D., Ward G., Lee E.S.: „A validation of a ray-tracing tool used to generate bi-directional scattering distribution functions for complex fenestration systems”, *Solar Energy*, 98 (2013) 404-414.
187. “Measurement and Verification Guidelines. Measurement and Verification for Performance-Based Contracts” Version 4.0, U.S. Department of Energy, Federal Energy Management Program, 2015. Dostęp na: <https://www.energy.gov/eere/femp/downloads/mv-guidelines-measurement-and-verification-performance-based-contracts-version>, data dostępu: 11 IV 2019.
188. Meroni I., Scamoni F., Tirloni P., Pollastro C., Lacci R.: „Experimental analysis of the energy performance of a passive attached sunspace”, *Solar Energy*, 47 (1991) 329-332.
189. Michnikowski P.: „Zużycie energii do ogrzewania lokalu w budynku wielorodzinnym”, *Rynek Energii*, 5 (2012) 81-86.
190. Mihalakakou G., Ferrante A.: „Energy conservation and potential of a sunspace: sensitivity analysis”, *Energy Conversion and Management*, 41 (2000) 1247-1264.
191. Mihalakakou G.: „On the use of sunspace for space heating/cooling in Europe”, *Renewable Energy*, 26 (2002) 415-429.



192. Mikoś J.: „Budownictwo ekologiczne”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
193. Mitchell R., Kohler C., Zhu L., Arasteh D., Carmody J., Huizenga C., Curcija D.: „Therm 6.3/Window 6.3 NFRC simulation manual”, Lawrence Berkeley National Laboratory, California 2011.
194. Moinard S., Guyon G. (red.): „Empirical validation of EDF, ETNA and GENEC test-cell models”, Report of Task 22, Project A.3, International Energy Agency, 2000.
195. Monge-Barrio A., Sánchez-Ostiz A.: „Energy efficiency and thermal behaviour of attached sunspaces in the residential architecture in Spain. Summer conditions”, *Energy and Buildings*, 108 (2015) 244-256.
196. Mørk O.C. (red.): „Simulation model validation using test cell data”, International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, Task 8, Report no 176, 1986.
197. Mottard J.M., Fissore A.: „Thermal simulation of an attached sunspace and its experimental validation”, *Solar Energy*, 81 (2007) 305-315.
198. Muneer T.: „Algorithms for estimating hourly solar irradiation on slopes”, *Journal of Building Services Engineering, Research and Technology*, 10 (1989) 81-83.
199. Muneer T.: „Solar radiation and daylight models”, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam 2004.
200. Muthers S., Laschewski G., Matzarakis A.: „The summers 2003 and 2015 in South-West Germany: heat waves and heat-related mortality in the context of climate change”, *Atmosphere*, 8 (2017) 224-237.
201. Narowski P.G.: „Dane klimatyczne do obliczeń energetycznych w budownictwie”, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 11 (2006) 22-27.
202. Narowski P.G.: „Obliczenia energetyczne budynków. Typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne dla obszaru Polski”, *Rynek Instalacyjny*, 10 (2008) 52-57.
203. Narowski P.G.: „Uproszczona metoda godzinowa obliczania ilości ciepła do ogrzewania i chłodzenia budynków”, *Ogrzewnictwo, Ciepłownictwo, Wentylacja*, 1 (2009) 27-32.
204. Neymar J. Judkoff R.: „International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method (IEA BESTEST). In-depth diagnostic cases for ground coupled heat transfer related to slab-on-grade construction” Technical Report NREL/TP-550-43388, National Renewable Energy Laboratory, 2008.
205. Neymar J. Judkoff R.: „International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method for Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Equipment Models (HVAC BESTEST). Volume 1: Cases E100–E200”, Technical Report NREL/TP-550-3015, International Energy Agency, National Renewable Energy Laboratory, 2002.

206. Neymar J. Judkoff R.: „International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method for Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Equipment Models (HVAC BESTEST). Volume 2: Cases E300–E545”, Technical Report NREL/TP-550-36754, International Energy Agency, National Renewable Energy Laboratory, 2004.
207. Nowak H., Nowak Ł., Śliwińska E., Staniec M.: „Effect of horizontal overhangs and glazing with spectral radiative properties on annual thermal balance of the building and thermal comfort”, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Central European Symposium on Building Physics, Vienna 2013.
208. Nowak H., Nowak Ł., Śliwińska E.: „The impact of different solar passive systems on energy saving in public buildings and occupants’ thermal and visual comfort”, Journal of Building Physics, 40 (2016) 177-197.
209. Nowak H., Nowak Ł., Śliwińska E.: „Wpływ systemów pasywnej kontroli zysków słonecznych na bilans energetyczny budynków oraz komfort cieplny i wizualny użytkowników”, Materiały Budowlane, 10 (2015) 66-69.
210. Nowak-Dzieszko K., Rojewska-Warc M.: „Influence of the balcony glazing construction on thermal comfort of apartments in retrofitted large panel buildings”, Procedia Engineering, 108 (2015) 481-487.
211. „Obwieszczenie 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”, Dz. U. 2015 nr 0, poz. 1422.
212. Oliveira Panão M.J.N., Camelo S.M.L., Gonçalves H.J.P.: „Solar Load Ratio and ISO 13790 methodologies: Indirect gains from sunspaces”, Energy and Buildings, 51 (2012) 212-222.
213. Oliveti G., Arcuri N., Bruno R., De Simone M.: „An accurate calculation model of solar heat gain through glazed surfaces”, Energy and Buildings 43 (2011) 269-274.
214. Oliveti G., Arcuri N., De Simone M., Bruno R.: „Solar heat gain and operative temperature in attached sunspaces”, Renewable Energy, 39 (2012) 241-249.
215. Oliveti G., De Simone M., Ruffolo S.: „Evaluation of the absorption coefficient for solar radiation in sunspaces and windowed rooms”, Solar Energy, 82 (2008) 212-219.
216. Oliveti G., De Simone M., Ruffolo S.: „Solar contribution evaluation for building attached sunspace in the Mediterranean climate”, Proceedings of the International Conference „Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment”, Santorini 2005.
217. Orgill J.F., Hollands K.G.T.: „Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface”, Solar Energy, 19 (1977) 357-359.
218. Owrak M., Aminy M., Jamal-Abad M.T., Dehghan M.: „Experiments and simulations on the thermal performance of a sunspace attached to a room including heat-storing porous bed and water tanks”, Building and Environment, 92 (2015) 142-151.

219. Owrak M., Aminya M., Jamal-Abada M.T., Dehghanb M.: „Experiments and simulations on the thermal performance of a sunspace attached to a room including heat-storing porous bed and water tanks”, *Building and Environment*, 92 (2015) 142-151.
220. Palomo del Barrio E., Guyon G.: „Application of parameters space analysis tools for empirical model validation”, *Energy and Buildings*, 36 (2004) 23-33.
221. Palomo del Barrio E., Guyon G.: „Theoretical basis for empirical model validation using parameters space analysis tools”, *Energy and Buildings*, 35 (2003) 985-996.
222. Palomo del Barrio E., Guyon G.: „Using parameters space analysis techniques for diagnostic purposes in the framework of empirical model validation. Theory, applications and computer implementation”, Report of Task 22, Subtask A, International Energy Agency, 2002.
223. Palomo E., Marco J., Madsen H.: „Methods to compare measurements and simulations”, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IBPSA Building Simulation Conference*, Nice 1991.
224. Panek A., Rucińska J.: „Analiza godzinowego algorytmu obliczania rocznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia budynku”, *Czasopismo Techniczne, Budownictwo 1-B*, 5 (2009) 191-198.
225. Passerini F., Albatici R., Frattari A.: „Quasi-steady state calculation method for energy contribution of sunspaces: a proposal for the European standard improvement”, *Proceedings of Building Simulation Applications BSA 2013, 1<sup>st</sup> IBPSA Italy Conference*, Bozen-Bolzano 2013.
226. Passerini F.: „Sunspaces for passive building heating. Calculation models and utilization of empirical data”, *Faculty of Engineering, University of Trento*, Trento 2012.
227. „Passive solar design strategies: guidelines for home building”, *Passive Solar Industries Council, Solar Energy Research Institute*, Buffalo, New York 1991.
228. Peacock A.D., Jenkins D.P., Kane D.: „Investigating the potential of overheating in UK dwellings as a consequence of extant climate change”, *Energy Policy*, 38 (2010) 3277-3288.
229. Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J., Steward R.: „Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance”, *Solar Energy*, 44 (1990) 271-289.
230. Perez R., Seals R., Ineichen P., Stewart R., Menicucci D.: „A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces”. *Solar Energy*, 39 (1987) 221-231.
231. Perez R., Stewart R., Arbogast C., Seals R., Scott J.: „An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: description, performance validation, site dependency evaluation”, *Solar Energy*, 36 (1986) 481-497.

232. Persson M.L., Roos A., Wall M.: „Influence of window size on the energy balance of low energy houses”, *Energy and Buildings*, 38 (2006) 181-188.
233. Pluta Z.: „Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
234. PN-74/B-02403 „Ogrzewnictwo. Temperatury obliczeniowe zewnętrzne”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1974.
235. PN-E-01005: 1990 „Technika świetlna. Terminologia”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1990.
236. PN-EN 12831: 2006 „Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2006.
237. PN-EN 15251: 2012 „Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego dotyczące projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków, obejmujące jakość powietrza wewnętrznego, środowisko cieplne, oświetlenie i akustykę”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2012.
238. PN-EN 15265: 2011 „Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń z zastosowaniem metod dynamicznych. Kryteria ogólne i procedury walidacji”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2011.
239. PN-EN ISO 10211: 2008 „Mostki cieplne w budynkach, strumienie ciepła i temperatury powierzchni, obliczenia szczegółowe, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2008.
240. PN-EN ISO 13789: 2008 „Ciepłne właściwości użytkowe budynków. Współczynniki przenoszenia ciepła przez ogrzewanie i wentylację. Metoda obliczania”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008.
241. PN-EN ISO 13790: 2009 „Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2009.
242. PN-EN ISO 13791: 2012 „Ciepłne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie temperatury wewnętrznej pomieszczenia w lecie, bez mechanicznego chłodzenia. Kryteria podstawowe i metody walidacji”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2012.
243. PN-EN ISO 13792: 2012 „Ciepłne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie temperatury wewnętrznej pomieszczenia w lecie, bez mechanicznego chłodzenia. Metody uproszczone”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2012.
244. PN-EN ISO 15927-1: 2005 „Cieplno-wilgotnościowe właściwości użytkowe budynków. Obliczanie i prezentacja danych klimatycznych. Część 1: średnie miesięczne niezależnych parametrów meteorologicznych”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2005.

245. PN-EN ISO 15927-4: 2007 „Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe budynków. Obliczanie i prezentacja danych klimatycznych. Część 4: Dane godzinowe do oceny rocznego zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2007.
246. PN-EN ISO 6946: 2008 „Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008.
247. PN-EN ISO 7730: 2006 „Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2006.
248. PN ISO 7726: 2001 „Ergonomia środowiska termicznego. Przyrządy do pomiaru wielkości fizycznych”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2001.
249. Poirazis H., Blomsterberg A., Wall M.: „Energy simulations for glazed office buildings in Sweden”, *Energy and Buildings*, 40 (2008) 1161-1170.
250. Polak A.: „Szkło i jego historia”, PWN, Warszawa 1981.
251. Porritt S., Cropper P., Shao L., Goodier C.: „Heat wave adaptations for UK dwellings and development of a retrofit toolkit”, *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 4 (2013) 269-286.
252. Porritt S., Shao L., Cropper P., Goodier C.: „Adapting dwellings for heat waves”, *Sustainable Cities and Society*, 1 (2011) 81-90.
253. Porritt S., Shao L., Cropper P., Goodier C.: „Occupancy patterns and their effect on interventions to reduce overheating in dwellings during heat waves”, *Proceedings of the Conference „Adapting to Change: New Thinking on Comfort”*, Cumberland Lodge, Windsor 2010.
254. Porteous C., MacGregor K.: „Solar architecture in cool climates”. Earthscan Publishers, London 2005.
255. „Presentation from EN 15265: 2007 with VIP-Energy version 3”. Dostęp na: [www.vipenergy.net/Presentation\\_from\\_EN15265.pdf](http://www.vipenergy.net/Presentation_from_EN15265.pdf), data dostępu: 19 V 2017.
256. Prochaska W.: „Szkło w budownictwie”. Arkady, Warszawa 1967.
257. Purdy J., Beausoleil-Morrison I.: „Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method for Heating, Ventilation, and Air-Conditioning Equipment Models (HVAC BESTEST): Fuel-fired furnace test cases”, Report of Task 22, Subtask C, Natural Resources Canada, International Energy Agency, 2003.
258. Reindl D.T., Beckman W.A., Duffie J.A.: „Diffuse fraction correlations”, *Solar Energy*, 45 (1990) 1-7.
259. Rempel A.R., Rempel A.W., Cashman K.V., Gates K.N., Page C.J., Shaw B.: „Interpretation of passive solar field data with EnergyPlus models: Un-conventional wisdom from four sunspaces in Eugene, Oregon”, *Building and Environment*, 60 (2013) 158-172,

260. Rode C., Hens H., Janssen H. (red.): „Annex 41 whole building heat, air, moisture response”, Proceedings of the IEA ECBCS Annex 41 Closing Seminar, Copenhagen 2008.
261. Rodler A., Virgone J., Roux J.J., Hubert J.L.: „Development and validation of a three dimensional thermal transient numerical model with sun patch: Application to a low energy cell”, *Energy and Buildings*, 87 (2014) 425-435.
262. Rodler A., Virgone J., Roux J.J.: „Impact of sun patch and three-dimensional heat transfer descriptions on the accuracy of a building's thermal behavior prediction”, *Building Simulation*, 9 (2016) 269-279.
263. Rodler A., Virgone J., Roux J.J.: „Impact of the sun patch on heating and cooling power evaluation for a low energy cell”, Proceedings of CISBAT 2013, Lausanne 2013.
264. Roels S.: „Final report Annex 41. Whole building heat, air and moisture response. Volume 2: Experimental analysis of moisture buffering”, IEA Annex 41, Subtask 2, International Energy Agency, 2008.
265. Rogalska M.: „Wieloczynnikowe modele w prognozowaniu czasu procesów budowlanych”, Politechnika Lubelska, Lublin 2016.
266. Roux J.J., Teodosiu C., Covalet D., Chareille R.: „Validation of a glazed space simulation model using full-scale experimental data”, *Energy and Buildings*, 36 (2004) 557-565.
267. „Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej”, Dz.U. 2015 poz. 376.
268. „Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 22 września 1999 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowego zakresu i formy audytu energetycznego oraz algorytmu oceny opłacalności przedsięwzięcia termomodernizacyjnego, a także wzorów kart audytu energetycznego”, Dz. U. 1999 nr 79 poz. 900.
269. Saelens D., Reynders G.: „Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements. Report of Subtask 4.b: Towards a characterisation of buildings based on in situ testing and smart meter readings and potential for applications in smart grids”, International Energy Agency, 2016.
270. Saman W., Boland J., Pullen S., de Dear R., Soebarto V., Miller W., Pocock B., Belusko M., Bruno F., Whaley D., Pockett J., Bennetts H., Ridley B., Palmer J., Zuo J., Ma T., Chileshe N., Skinner N., Chapman J., Vujinovic N., Walsh M., Candido C., Deuble M.: „A framework for adaptation of Australian households to heat waves”, National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast 2013.
271. Samborski A.S.: „Bioklimatyczne warunki Zamojszczyzny”, *Acta Agrophysica*, 6 (2005) 529-536.



272. Sánchez-Ostiz A., Monge-Barrio A., Domingo-Irigoyen S., González-Martínez P.: „Design and experimental study of an industrialized sunspace with solar heat storage”, *Energy and Buildings*, 80 (2014) 231-246.
273. Sarosiek W.: „Model obliczeniowy zapotrzebowania na energię do ogrzewania pomieszczenia przystosowanego do biernego wykorzystania promieniowania słonecznego”, Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Białystok 1995.
274. Sdringola P., Proietti S., Desideri U., Giombini G.: „Thermo-fluid dynamic modeling and simulation of a bioclimatic solar greenhouse with self-cleaning and photovoltaic glasses”, *Energy and Buildings*, 68 (2014) 183-195.
275. Smolec W.: „Fototermiczna konwersja energii elektrycznej”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
276. Smoyer-Tomic K.E., Kuhn R., Hudson A.: „Heat wave hazards: an overview of heat wave impacts in Canada”, *Natural Hazards*, 28 (2003) 463-485.
277. Solomon S., Qin D., Manning M., Marquis M., Averyt K., Tignor M., Miller H.L., Chen Z.: „Climate change 2007: The physical science basis”, Part of the Working Group I contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge 2007.
278. Staniszewski W.: „Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne”, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1979.
279. Stoios A., Bougiatioti F., Oikonomou A.: „Thermal performance of a passive solar house for continental climate, in Florina, north-western Greece”, *Proceedings of PLEA 2006 - the 23<sup>rd</sup> Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Geneva 2006.
280. Strachan P., Monari F., Kersken M., Heusler I.: „IEA Annex 58: Full-scale empirical validation of detailed thermal simulation programs”, *Energy Procedia*, 78 (2015) 3288-3293.
281. Strachan P., Svehla K., Kersken M., Heusler I.: „Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements. Report of Subtask 4.a: Empirical validation of common building energy simulation models based on in situ dynamic data”, International Energy Agency, 2016.
282. Strom I., Joosten L., Boonstra Ch.: „Passive houses solutions”, *Intelligent Energy Europe 2006*. Dostęp na: [http://erg.ucd.ie/pep/pdf/Passive\\_House\\_Sol\\_English.pdf](http://erg.ucd.ie/pep/pdf/Passive_House_Sol_English.pdf), data dostępu: 02 II 2019.
283. Suárez López M.J., Gutiérrez Trashorras A.J., Parrondo Gayo J.L., Blanco Marigorta E.: „Analysis of an attached sunspace with a thermal inertia floor”, *Energies*, 11 (2018) 1136-1150.
284. Suárez M.J., Gutiérrez A.J., Pistono J., Blanco E.: „CFD analysis of heat collection in a glazed gallery”, *Energy and Buildings*, 43 (2011) 108-116.
285. Ślusarek J., Wilk-Słomka B.: „Procesy termiczne w przegrodach budowlanych o złożonej strukturze”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.



286. Temps R.C., Coulson K.L.: „Solar radiation incident upon slopes of different orientations”, *Solar Energy*, 19 (1977) 179-184.
287. „The limits of thermal comfort: Avoiding overheating in European buildings. CIBSE TM52”, Chartered Institution of Building Services Engineers, London 2013.
288. „The passive house planning package (PHPP)”, Passivhaus Institut, 2012.
289. Thomsen K.E., Schultz J.M., Poel B.: „Measured performance of 12 demonstration projects - IEA Task 13 “Advanced solar low energy buildings”, *Energy and Buildings*, 37 (2005) 111-119.
290. Tiwari G.N., Gupta A., Gupta R.: „Evaluation of solar fraction on north partition wall for various shapes of solarium by Auto-Cad”, *Energy and Buildings*, 35 (2003) 507-514.
291. „Climate change and the indoor environment: Impacts and adaptation. CIBSE TM36”, Chartered Institution of Building Services Engineers, London 2005.
292. Travesi J., Maxwell G., Klaassen C., Holtz M. (red.): „Empirical validation of Iowa Energy Resource Station building energy analysis simulation models”, Report of Task 22, Subtask A, International Energy Agency, 2001.
293. „Ustawa z dnia 25 lutego 2016 r. o ponownym wykorzystywaniu informacji sektora publicznego”, *Dz. U. z 2016 r., poz. 352*.
294. „Validation of IDA Indoor Climate and Energy 4.0 with respect to CEN Standards EN 15255: 2007 and EN 15265: 2007”, Technical Report, EQUA Simulation, 2010.
295. Van Dijk D., Spiekman M. (red.): „Energy performance of buildings. Outline for harmonised EP procedures” Final Report of EU ENPER Project, Task B6, TNO Building and Construction Research, Delft 2004.
296. Van Dijk H.A.L., Knorr K.T. (red.): „Thermal and solar properties of windows. Expert guide”, International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, Annex 12 „Windows and Fenestration”, Delft 1987.
297. Virk D., Eames M.: „CIBSE Weather Files 2016 release: Technical briefing and testing”. Dostęp na <https://www.cibse.org/weatherdata>, data dostępu: 16 VII 2018.
298. Voeltzel A., Carrié F.R., Guarracino G.: „Thermal and ventilation modelling of large highly-glazed spaces”, *Energy and Buildings*, 33 (2001) 121-132.
299. Vukadinović A., Radosavljević J., Dordević A., Vasović D., Janačković G.: „Sun-spaces as passive design elements for energy efficient and environmentally sustainable housing”, *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference “Industrial Engineering and Environmental Protection”*, Zrenjanin 2018.
300. Wall M.: „A design tool for glazed spaces. Part I: Description”, *ASHRAE Transactions* 101 (1995) 1261-1271.
301. Wall M.: „Climate and energy use in glazed spaces”, Report TABK-96/1009, Lund University, Department of Building Science, Lund 1996.

302. Wall M.: „Distribution of solar radiation in glazed spaces and adjacent buildings. A comparison of simulation programs”, *Energy and Buildings*, 26 (1997) 129-135.
303. Watson D., Labs K.: „Climatic design: Energy-efficient building principles and practices”, McGraw-Hill Book Company, New York 1983.
304. Wehle-Strzelecka S.: „Energia Słońca w kształtowaniu środowiska mieszkaniowego – ewolucja koncepcji na przestrzeni wieków”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2014.
305. Wiśniewski S., Wiśniewski T.S.: „Wymiana ciepła”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.
306. Wittchen K.B., Johnsen K., Grau K.: „BSim user's guide”, Danish Building Research Institute, Hørsholm 2004.
307. Włodarczyk D., Nowak H.: „Statistical analysis of solar radiation models onto inclined planes for climatic conditions of Lower Silesia in Poland”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 9 (2009) 127-144.
308. Wołoszyn M., Rode C.: „Final report Annex 41. Whole building heat, air and moisture response. Volume 1: Modelling principles and common exercises”, IEA Annex 41, Subtask 1, International Energy Agency, 2008.
309. Wołoszyn M.A.: „Wykorzystanie energii słonecznej w budownictwie jednorodzinym”, Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa 1991.
310. Wright D.: „Natural solar architecture: the passive solar primer”, Van Nostrand Reinhold Company, New York 1984.
311. „Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2018 r.”, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2019.
312. Żukowski M.: „Modelowanie zużycia ciepła w budynku”, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, *Studia z Zakresu Inżynierii* Nr 79, Warszawa-Białystok 2012.

## Streszczenie

Systemy pasywne wykorzystywane są od lat, łącząc ochronę cieplną i akustyczną pomieszczeń z dużą atrakcyjnością architektoniczną. W większości przypadków trudno jest jednak mówić o świadomym ich projektowaniu, ponieważ podstawowe parametry decydujące o efektywności systemu na ogół dobierane są intuicyjnie przez projektantów, bez przeprowadzania szczegółowej oceny skuteczności proponowanych rozwiązań. Taki stan rzeczy nie pozwala wykorzystać w pełni potencjału szklarni w sezonie grzewczym, a w okresie letnim w nieuzasadniony sposób może zwiększyć obciążenie cieplne sąsiednich pomieszczeń mieszkalnych.

Najważniejszymi celami pracy są: analiza w jaki sposób zabudowa balkonów wpływa na wymianę ciepła i warunki termiczne w mieszkaniach w polskich warunkach klimatycznych oraz ustalenie, jakie rozwiązania są najbardziej korzystne z punktu widzenia ograniczenia całorocznego zapotrzebowania na energię.

W badaniach posłużono się (między innymi) dynamicznymi symulacjami komputerowymi, wykonywanymi z krótszym niż godzinowy krokiem obliczeniowym. Program symulacyjny poddany został walidacji doświadczalnej i porównawczej. Symulacje i obliczenia wykonano korzystając z wieloletnich uśrednionych danych klimatycznych zawartych w Typowym Roku Meteorologicznym. Ocenę możliwości przegrzewania w ekstremalnych warunkach letnich oparto na rzeczywistych danych pomiarowych z lat 2001 – 2015, zawartych w bazie danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego.

Główna część pracy zawiera szczegółową ocenę wybranych wariantów obudowy szklarni w przykładowym mieszkaniu o różnej lokalizacji w budynku i położeniu względem stron świata, ze szczególnym zwróceniem uwagi na wpływ powłok spektralnie selektywnych na bilans energetyczny przestrzeni słonecznej i przyległych pomieszczeń. Analizy pozwoliły ustalić, które z rozwiązań są najbardziej korzystne z punktu widzenia minimalizacji zapotrzebowania na ciepło i chłód, a także jakiego rzędu oszczędności energetyczne można uzyskać dzięki systemom szklarniowym w polskim klimacie. Rozpoznano również warunki wewnętrzne w przestrzeni mieszkalnej sąsiadującej ze szklarnią pod kątem komfortu wewnętrznego i możliwości adaptacyjnych w okresie wysokich temperatur zewnętrznych i fal upałów odnotowywanych w lecie. Ponadto, w pracy zaproponowano własną metodę określania efektywności systemów szklarniowych z oszkleniami o zróżnicowanych właściwościach optycznych, wykorzystującą natężenie promieniowania padającego na obudowę od strony zewnętrznej.

Częścią badań nad systemami szklarniowymi był także monitoring temperatury w mieszkaniach z oszklonymi balkonami, zlokalizowanych w budynkach wielorodzinnych w Lublinie i Zamościu. Rejestracja temperatury odbywała się w okresach 9. miesięcznych w roku 2017 i 2018, obejmując część sezonu grzewczego i miesiące letnie. Na podstawie danych pomiarowych ustalono wpływ systemów szklarniowych na straty ciepła w pomieszczeniach mieszkalnych oraz oceniono warunki termiczne panujące w lecie.

## Abstract

Passive systems have been used for years. They combine heat protection and acoustic protection of various rooms with great architectural attractiveness. In most cases, however, it is hard to speak about their conscious design, as the basic parameters related to the system efficiency are usually chosen intuitively by the designers, and no particular estimation of the effectiveness of the proposed solution is carried out. Such a state of affairs does not allow to fully use the potential of a greenhouse during the heating season, while during summer months it can cause an unreasonable heating load of the neighbouring habitable rooms.

The most important objectives of the presented research are: the analysis of the influence exerted by the balcony casing upon the heat exchange and the thermal conditions of the flats in our Polish climatic conditions, as well as determining which solutions are most profitable for the yearly energy need.

For the sake of the research, computer dynamic simulations were used (among others) with a time step shorter than one hour. The simulation program went through experimental and comparative validation. Simulations and calculations were performed taking advantage of the averaged climatic data included in the Typical Meteorological Year. The estimation of the chance of overheating in extreme summer conditions was based upon the real measurement data of 2001 – 2015, included in the database of the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute.

The main part of the paper comprises a detailed evaluation of the chosen variants of the greenhouse casing in an exemplary flat of various locations within the building as well as the relation to the cardinal directions. Special attention is paid to the influence of the spectrally selective glazing upon the energy balance of the sunspace and the neighbouring rooms. The analyses made it possible to determine which solutions were most advantageous for minimizing heating and cooling demand, as well as what kind of energy savings can be obtained due to greenhouse systems in the Polish climate.

Likewise, the internal conditions in the habitable space adjacent to the greenhouse were recognized from the point of view of the internal comfort and the adaptation possibilities at the time of high external temperatures and the heat waves observed in summer. Moreover, there was proposed an individual method of determining the effectiveness of greenhouse systems, with spectrally selective glazing, using the intensity of solar radiation acting upon the casing from outside.

A part of the research was also monitoring of temperature in the flats with glazed balconies located in multifamily buildings in Lublin and Zamość. Temperature registration was performed for nine-month periods during 2017 and 2018, comprising a part of the heating season and the summer months. Based on the measurement data, the influence of greenhouse systems upon the heat losses in habitable rooms was determined, and the summer thermal conditions were estimated.





