

Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania



Rozprawa doktorska

**Energetyczna i środowiskowa efektywność
ogrzewania, chłodzenia i wentylacji
budynków mieszkalnych**

mgr inż. Izabela Sarna

Dyscyplina naukowa:
Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

Promotor:
dr hab. inż. Joanna Ferdyn-Grygierek, prof. w Politechnice Śląskiej

Promotor pomocniczy:
dr inż. Agnieszka Palmowska

Gliwice 2025

Podziękowania

Pragnę serdecznie podziękować wszystkim tym, którzy przyczynili się do powstania tej pracy. W szczególności Pani Profesor Joannie Ferdyn-Grygierek za opiekę naukową, poświęcony czas i cierpliwość oraz Pani dr inż. Agnieszce Palmowskiej za wsparcie merytoryczne, cenne uwagi oraz liczne godziny konsultacji.

Za udostępnienie własnego domu do prowadzenia pomiarów oraz przekazanie niezbędnych i wyczerpujących informacji na jego temat dziękuję Właścicielom.

Słowa podziękowania należą się także Panu Profesorowi Krzysztofowi Grygierkowi za pomoc przy nauce modelowania w programie EnergyPlus oraz chęć dzielenia się wiedzą.

Dziękuję także Koleżankom i Kolegom z Katedry Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania za chęć pomocy oraz serdeczność, w szczególności mgr inż. Karolinie Szulc.

Dziękuję mojemu Mężowi, Rodzinie i Przyjaciółom za wsparcie, wyrozumiałość i pomoc.

Pracę dedykuję moim Rodzicom w podziękowaniu za okazane wsparcie w trakcie wszystkich etapów mojej edukacji.

Spis treści

Streszczenie	8
Abstract	10
Spis (ważniejszych) oznaczeń i indeksów	12
Słownik pojęć	15
1 Wstęp.....	17
2 Identyfikacja budynków jednorodzinnych pod względem kształtu, konstrukcji i systemów HVAC	19
2.1 Rodzaje i kształt	19
2.2 Technologie budowy domu.....	20
2.3 Systemy HVAC.....	21
2.3.1 Ogrzewanie	22
2.3.2 Wentylacja	23
2.3.3 Chłodzenie	26
3 Aktualny stan wiedzy	27
3.1 Pasywne sposoby chłodzenia budynków	27
3.2 Dane klimatyczne a ocena wydajności energetycznej budynku	35
3.3 Ocena rozkładu parametrów w pomieszczeniu z wentylacją naturalną	37
3.4 Wpływ systemów HVAC na środowisko zewnętrzne	39
3.5 Podsumowanie i luka badawcza.....	43
4 Cel i zakres rozprawy	47
5 Pomiarowa identyfikacja środowiska wewnętrznego	49
5.1 Obiekt wybrany do badań	49
5.2 Metodyka badań.....	52
5.2.1 Pomiar temperatury i wilgotności względnej powietrza	52
5.2.2 Ocena wymiany powietrza metodą gazu znacznikowego	52
5.2.3 Badania komfortu cieplnego	54
5.2.4 Pomiar prędkości strugi powietrza.....	55
5.3 Wyniki.....	56
5.3.1 Ocena środowiska cieplnego.....	57
5.3.2 Ocena komfortu cieplnego	60
5.3.3 Ocena wentylacji naturalnej	63
6 Model cieplny do symulacji wydajności budynku.....	66
6.1 Charakterystyka programu EnergyPlus.....	66

6.2	Charakterystyka programu CONTAM	66
6.3	Kosymulacja	67
6.4	Wielostrefowy model budynku jednorodzinnego.....	69
6.4.1	Model cieplny	69
6.4.2	Ogrzewanie	70
6.4.3	Wentylacja	72
6.4.4	Chłodzenie	74
6.4.5	Model komfortu cieplnego	75
6.4.6	Klimat zewnętrzny.....	76
6.5	Walidacja eksperymentalna i dostrajanie modelu cieplnego.....	79
7	Modelowanie numeryczne CFD przepływu powietrza (wentylacji naturalnej) w pomieszczeniu.....	84
7.1	Charakterystyka programu ANSYS Fluent	84
7.2	Opis pomieszczenia	84
7.3	Model numeryczny	85
7.4	Siatka obliczeniowa	85
7.5	Warunki brzegowe.....	87
7.6	Przebieg symulacji.....	90
7.7	Walidacja eksperymentalna modelu numerycznego CFD.....	90
8	Studium przypadku.....	99
8.1	Symulacje energetyczne budynku	99
8.1.1	Warianty	100
8.1.2	Kryteria oceny warunków środowiska wewnętrznego	105
8.1.3	Ocena wpływu zastosowania rolet wewnętrznych na oknach na efektywność pasywnego chłodzenia	106
8.1.4	Ocena wpływu otwarcia drzwi wewnętrznych na efektywność pasywnego chłodzenia	107
8.1.5	Ocena wpływu zachowania mieszkańców na efektywność pasywnego chłodzenia..	112
8.1.6	Porównanie ręcznego i automatycznego otwierania okien.....	114
8.1.7	Ocena zużycia energii w budynku na potrzeby ogrzewania, chłodzenia i wentylacji	118
8.2	Prognozowanie numeryczne CFD rozkładu parametrów powietrza w pomieszczeniu.....	123
8.2.1	Warianty	125
8.2.2	Warunki brzegowe.....	126
8.2.3	Kryteria oceny warunków środowiska wewnętrznego w ujęciu lokalnym	127

8.2.4	Wyniki.....	129
8.2.5	Ocena wpływu otwarcia drzwi wewnętrznych na warunki środowiska wewnętrznego w ujęciu lokalnym.....	130
8.2.6	Ocena wpływu prędkości wiatru na rozkład prędkości powietrza w pomieszczeniu	134
8.2.7	Ocena wpływu temperatury powietrza zewnętrznego na warunki środowiska wewnętrznego w ujęciu lokalnym.....	138
8.2.8	Ocena wpływu wychłodzenia nocnego na warunki środowiska wewnętrznego w ujęciu lokalnym.....	139
9	Analiza kosztów środowiskowych.....	142
9.1	Ocena emisji ditlenku węgla przez stosowane systemy HVAC.....	143
9.2	Ocena możliwości ograniczenia emisji ditlenku węgla przez zastosowanie paneli fotowoltaicznych.....	144
10	Dyskusja.....	147
11	Podsumowanie i wnioski.....	153
	Bibliografia.....	157
	Spis tabel	172
	Spis rysunków	174
	Spis załączników	178
	Załącznik nr 1	179
	Załącznik nr 2	184
	Załącznik nr 3	188

Streszczenie

Współczesne budownictwo mieszkaniowe stoi przed wyzwaniem pogodzenia komfortu użytkowania z minimalizacją negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Efektywność energetyczna systemów ogrzewania, chłodzenia i wentylacji (HVAC) odgrywa kluczową rolę w redukcji zużycia energii i emisji gazów cieplarnianych. Głównym celem rozprawy była ocena skuteczności konwencjonalnych i alternatywnych sposobów chłodzenia pomieszczeń w budynku jednorodinnym z wentylacją naturalną z punktu widzenia zapewnienia komfortu cieplnego mieszkańcom, zużycia energii na potrzeby ogrzewania, chłodzenia i wentylacji oraz emisji gazów cieplarnianych do atmosfery w obecnych i przyszłych warunkach klimatycznych.

W pierwszym kroku dokonano przeglądu literatury z zakresu tematyki rozprawy wraz ze wskazaniem luki badawczej. Następnie przeprowadzono pomiarową identyfikację środowiska wewnętrznego w wybranym domu jednorodzonym. W trzecim kroku przygotowano modele numeryczne tego budynku: (1) w programie EnergyPlus połączonym z programem CONTAM, co umożliwiło przeprowadzenie kosymulacji wydajności budynku BPS (ang. Building Performance Simulation) z uwzględnieniem międzystrefowego przepływu powietrza oraz (2) w programie ANSYS Fluent, do przeprowadzenia prognozowania numerycznego CFD w celu oceny rozkładu parametrów powietrza w wybranym pomieszczeniu. Dla potwierdzenia wiarygodności otrzymanych wyników symulacji wykonano walidację eksperymentalną wraz dostrajaniem modeli numerycznych.

Przygotowane modele umożliwiły przeprowadzanie studium przypadku, podzielonego na dwie części. W ramach pierwszej z nich analizowano konwencjonalne i pasywne sposoby chłodzenia budynku z wykorzystaniem naturalnego chłodu powietrza zewnętrznego dla obecnego i przyszłego prognozowanego klimatu zewnętrznego dla Polski. Wśród metod pasywnych analizowano otwieranie okien przez mieszkańców oraz za pomocą automatycznych siłowników. Dokonano oceny wpływu otwarcia lub zamknięcia drzwi wewnętrznych, zastosowania rolet wewnętrznych oraz zachowania mieszkańców w zakresie otwierania i zamykania okien na efektywność pasywnego chłodzenia biorąc pod uwagę liczbę godzin dyskomfortu cieplnego ludzi i wymianę powietrza. Następnie porównano zużycie energii w systemach ogrzewania, chłodzenia i wentylacji w budynku chłodzonym pasywnie i mechanicznie. W drugiej części studium przypadku analizowano wpływ pasywnego chłodzenia powietrzem zewnętrznym na rozkład parametrów powietrza w pomieszczeniu przy zamkniętych i otwartych drzwiach wewnętrznych, różnych prędkościach wiatru oraz w godzinach nocnego chłodzenia. Oceniono także ryzyko wystąpienia przeciągu. Następnie przeprowadzono analizę kosztów środowiskowych obejmującą obliczenia emisji dwutlenku węgla przy stosowanych systemach HVAC z uwzględnieniem różnych źródeł ciepła.

Przeprowadzona analiza wyników pozwoliła na określenie ilościowej i jakościowej efektywności zaproponowanych technik pasywnego chłodzenia pomieszczeń mieszkalnych. Najbardziej skuteczne i efektywne było chłodzenie powietrzem

zewnątrznym przy automatycznym otwieraniu okien. Zapewniało warunki komfortu cieplnego mieszkańców przez przynajmniej 94% procent czasu w klimacie obecnym i 87% w klimacie prognozowanym na 2050 rok. W porównaniu z chłodzeniem mechanicznym budynek zużywał o 9% (klimat obecny) i 14% (klimat 2050) mniej energii na cele ogrzewania i chłodzenia oraz emitował średnio o 11% mniej ditlenku węgla. Mniejszą efektywność stwierdzono przy ręcznym otwieraniu okien, szczególnie przy uwzględnieniu scenariuszy z prawdopodobieństwem zachowania się mieszkańców niezgodnie z przyjętymi kryteriami. Jako główne ograniczenie chłodzenia pasywnego przez otwieranie okien wskazano problem z dostosowaniem wymiany powietrza w pomieszczeniach w granicach akceptowalnych dla mieszkańców. W okresach z dużymi prędkościami wiatru znaczna wymiana powietrza w pomieszczeniu powodowała ryzyko powstawania przeciągu; z kolei przy bezwietrznej pogodzie oraz przy zamkniętych oknach przepływ powietrza był znikomy. Wyniki symulacji CFD uwiaryściły zjawisko powstawania „martwych stref powietrza” niezależnie od wartości prędkości wiatru. Przepływ powietrza o zbyt niskiej prędkości wstępował w znacznej części pomieszczenia, na którą nie oddziaływała struga powietrza nawiewanego przez okno nawet przy otwartych drzwiach wewnętrznych. Analiza kosztów środowiskowych utrzymania systemów HVAC wykazała, że najmniejszą emisyjność ma zastosowanie kotła gazowego jako źródła ciepła, a największą zastosowanie kotła elektrycznego. W celu większego ograniczenia emisji ditlenku węgla zaproponowano zastosowanie paneli fotowoltaicznych, które spowodowały redukcję emisji CO₂ do atmosfery o nawet 60%.

Słowa kluczowe: symulacje cieplne budynków, CFD, chłodzenie pasywne, zużycie energii, komfort cieplny, emisja CO₂.

Abstract

Modern residential construction encounters the challenge of reconciling the comfort of use with minimizing the negative impact on the natural environment. The energy efficiency of heating, cooling, and ventilation (HVAC) systems plays a critical role in reducing energy consumption and greenhouse gas emissions. The main objective of the dissertation was to assess the effectiveness of conventional and alternative methods of cooling rooms in a single-family house with natural ventilation focusing on thermal comfort for occupants, energy consumption for heating, cooling, and ventilation, and greenhouse gas emissions under current and future climate conditions.

In the first step, a review of the literature on the subject of the dissertation was conducted, along with the indication of the research gap. Then, measurement identification of the indoor environment in the selected single-family house was carried out. In the third step, numerical models of this building were prepared: (1) in the EnergyPlus program combined with the CONTAM program, which enabled the co-simulation of the building performance BPS (Building Performance Simulation) taking into account the inter-zone airflow and (2) in the ANSYS Fluent program, to perform CFD numerical prediction to assess the distribution of air parameters in the selected room. Experimental validation and calibration of the numerical models were carried out to ensure the reliability of the simulation results.

The prepared models enabled the case study to be conducted, divided into two parts. The first part investigated conventional and passive methods of cooling the building using the natural cooling potential of outdoor air under current and forecasted future climatic conditions in Poland. Passive techniques analysed included scenarios with manual window operation by residents and the use of automatic actuators. The impact of opening or closing internal doors, the use of internal blinds, and the behaviour of residents in terms of opening and closing windows on the efficiency of passive cooling was assessed, taking into account the number of hours of thermal discomfort of people and air exchange. Furthermore, energy consumption for heating, cooling, and ventilation in passively cooled versus mechanically cooled buildings was compared. The second part of the case study focused on the impact of passive cooling with outdoor air on the air parameter distribution in a single room. The analysis considered variations in internal door positioning (open or closed), wind speed, and night-time cooling periods. The risk of draughts was also evaluated. Additionally, an environmental cost analysis was conducted, including calculations of carbon dioxide emissions associated with HVAC systems, accounting for different heat sources.

The analysis of the results allowed determining the quantitative and qualitative effectiveness of the proposed passive cooling techniques for residential buildings. The most efficient strategy involved outdoor air cooling combined with automatic window operation, which ensured thermal comfort for at least 94% of the time under current climatic conditions and 87% under the forecasted 2050 climate. Compared to mechanical cooling, this method reduced energy consumption for heating and cooling by 9% under present climate conditions and by 14% under future scenarios, while also decreasing carbon dioxide emissions by an average of 11%. Manual window operation demonstrated lower efficiency,

particularly in scenarios in which occupant behaviour deviated from the predefined criteria. A significant limitation of passive cooling via window operation was a difficulty in maintaining acceptable air exchange. During periods of high wind speed, excessive air exchange increased the risk of draught formation, whereas in calm conditions with closed windows, air exchange was insufficient. The CFD simulation results revealed a phenomenon of the formation of “dead air zones” regardless of the wind speed. The airflow with too low speed occurred in a significant part of the room, which was not affected by the air stream blown through the window even with the internal doors open.

The environmental costs analysis of maintaining HVAC systems showed that the use of a gas boiler as a heat source resulted in the lowest emission, while an electric boiler produced the highest one. To further mitigate carbon dioxide emissions, the implementation of photovoltaic panels was proposed, achieving reductions in emissions by up to 60%.

Keywords: building performance simulation, CFD, passive cooling, energy consumption, thermal comfort, CO₂ emission

Spis (ważniejszych) oznaczeń i indeksów

EP	–	EnergyPlus
CFD	–	Komputerowa Mechanika Płynów (ang. Computational Fluid Dynamics)
HVAC	–	Ogrzewanie, Wentylacja i Klimatyzacja (ang. Heating, Ventilation, Air Conditioning)
BPS	–	Symulacja Wydajności Budynku (ang. Building Performance Simulation)
U	–	współczynnik przenikania ciepła, $W/(m^2 \cdot K)$
g	–	współczynnik przepuszczalności promieniowania, %
$C(\tau)$	–	stężenie znacznika w chwili τ , ppm; mg/m^3
$C(\infty)$	–	tło stężenia znacznika w powietrzu (ppm); mg/m^3
$C(0)$	–	stężenie znacznika dla $\tau = 0$ (ppm)
a	–	współczynnik szczelności okna, $m^3/(m \cdot h \cdot Pa^n)$
l	–	długość szczeliny okiennej, m
C	–	empiryczny współczynnik przepływu, $\frac{m^3}{h \cdot Pa^n}$
Δp	–	różnica ciśnienia, Pa
H_{dys}	–	liczba godzin dyskomfortu, h
N	–	liczba wymian powietrza w pomieszczeniu, h^{-1}
N_{min}	–	minimalna liczba wymian powietrza w pomieszczeniu, h^{-1}
$\dot{V}$	–	strumień powietrza wentylacyjnego, m^3/h
V	–	kubatura pomieszczenia, m^3
E_{CO_2}	–	emisja CO_2 , tCO_2/rok
$E_{CO_2,H}$	–	wielkość emisji CO_2 pochodzącej z procesu spalania paliw przez system ogrzewania, tCO_2/rok
$E_{CO_2,C}$	–	wielkość emisji CO_2 pochodzącej z procesu spalania paliw przez system chłodzenia, tCO_2/rok
$W_{e,H}$	–	wskaźnik emisji CO_2 w zależności od spalanego paliwa przez system ogrzewania, tCO_2/TJ

$W_{e,C}$	–	wskaźnik emisji CO ₂ w zależności od spalanego paliwa przez system chłodzenia, tCO ₂ /TJ
$Q_{k,H}$	–	zużycie ciepła, kWh
$Q_{k,C}$	–	zużycie chłodu, kWh
Q_H	–	zapotrzebowanie na ciepło, kWh
Q_C	–	zapotrzebowanie na ciepło, kWh
w	–	prędkość wiatru, m/s
t_e	–	temperatura powietrza zewnętrznego, °C
t_i	–	temperatura powietrza wewnętrznego, °C
t_{max}	–	maksymalna temperatura powietrza wewnętrznego, °C
t_{min}	–	minimalna temperatura powietrza wewnętrznego, °C
t_{sr}	–	średnia temperatura powietrza wewnętrznego, °C
t_a	–	lokalna temperatura powietrza wewnętrznego, °C
t_g	–	temperatura poczernionej kuli, °C
t_o	–	temperatura operatywna, °C
t_{mr}	–	średnia temperatura promieniowania, °C
v_i	–	prędkość powietrza wewnętrznego, m/s
v_{min}	–	minimalna prędkość powietrza wewnętrznego, m/s
v_{max}	–	maksymalna prędkość powietrza wewnętrznego, m/s
v_{sr}	–	średnia prędkość powietrza wewnętrznego, m/s
v_a	–	lokalna prędkość powietrza wewnętrznego, m/s
v_o	–	udział procentowy martwej strefy powietrza
SD	–	odchylenie standardowe prędkości m/s
Tu	–	intensywność turbulencji, %
PMV	–	przewidywana średnia ocena komfortu cieplnego
PPD	–	przewidywalny odsetek niezadowolonych, %
DR	–	wskaźnik ryzyka przeciągu, %
Y^+	–	względna odległość przyścienna (lokalna liczba Reynoldsa)

$NMBE$	–	znormalizowany średni błąd odchylenia, %
$CV(RMSE)$	–	współczynnik zmienności średniego błędu kwadratowego, %
R	–	współczynnik korelacji Pearsona
D_i	–	błąd względny
$ \bar{D} $	–	średni błąd względny
$NMSE$	–	znormalizowany średni błąd kwadratowy
FB	–	odchylenie ułamkowe
k	–	liczba wartości porównywanych
M_i	–	wartość pomiarowa
S_i	–	wartość symulowana
$\overline{M}_t$	–	średnia arytmetyczna wartości pomiarowych
$\overline{S}_t$	–	średnia arytmetyczna wartości symulowanych
δ	–	różnica między wartościami wielkości symulowanej w dwóch programach

Słownik pojęć

Zużycie ciepła – odpowiada energii końcowej, którą zgodnie z rozporządzeniem [1] należy rozumieć jako energię dostarczaną do budynku lub jego części na potrzeby ogrzewania;

Zużycie chłodu – odpowiada energii końcowej, którą zgodnie z rozporządzeniem [1] należy rozumieć jako energię dostarczaną do budynku lub jego części na potrzeby chłodzenia;

Zapotrzebowanie na ciepło – odpowiada energii użytkowej, którą zgodnie z rozporządzeniem [1] należy rozumieć jako energię przenoszoną z budynku lub jego części do jego (jej) otoczenia przez przenikanie lub z powietrzem wentylacyjnym, pomniejszoną o zyski ciepła;

Zapotrzebowanie na chłód – odpowiada energii użytkowej, którą zgodnie z rozporządzeniem [1] należy rozumieć jako zyski ciepła pomniejszone o energię przenoszoną z budynku lub jego części do jego (jej) otoczenia przez przenikanie lub z powietrzem wentylacyjnym;

Emisja CO₂ – wielkość emisji ditlenku węgla (gazu cieplarnianego) wprowadzanego do powietrza, bezpośrednio lub pośrednio, w wyniku działalności człowieka (pochodząca z procesu spalania paliw przez system HVAC budynku) wyrażona tCO₂/rok [1, 2];

Temperatura operatywna – jednolita temperatura wyobrazonego czarnego pomieszczenia, w którym wymiana ciepła poprzez promieniowanie i konwekcję pomiędzy ciałem człowieka a tym pomieszczeniem jest takie samo, jak w przypadku wymiany ciepła w rzeczywistym pomieszczeniu o niejednorodnym środowisku [3];

Liczba godzin dyskomfortu cieplnego – liczba godzin, w czasie których temperatura operatywna powietrza nie mieściła się w dopuszczalnym zakresie temperatury komfortu adaptacyjnego dla drugiej kategorii środowiska wewnętrznego (akceptowalność 80%) w danym pomieszczeniu z przebywającymi ludźmi;

Okres chłodzenia – czas w ciągu roku (od maja do września), w którym było realizowane chłodzenie pasywne powietrzem zewnętrznym;

Strefa cieplna – przestrzeń budynku (pomieszczenie lub grupa pomieszczeń) o podobnym lub identycznym przeznaczeniu i funkcji oraz identycznej zadanej temperaturze chłodzenia i ogrzewania;

TLM2000 – typowe lata meteorologiczne dla obszaru Polski opracowane na podstawie danych meteorologicznych i klimatycznych z lat 2001 – 2020;

TLM1970 – typowe lata meteorologiczne dla obszaru Polski opracowane na podstawie danych meteorologicznych i klimatycznych z lat 1971-2000.

Definicje komponentów i funkcji programu EnergyPlus (EP) [4,5]:

System idealny (ang. IdealLoadsAirSystem) – teoretyczny system ogrzewania i chłodzenia budynku spełniający wymagane zapotrzebowanie na ciepło i chłód w danej strefie ze 100% efektywnością przez cały czas. Do zamodelowania tego systemu nie tworzy się całego systemu HVAC, a jedynie idealną jednostkę VAV o zmiennej temperaturze i wilgotności zasilania. Strumień powietrza nawiewanego przez jednostkę przyjmuje wartości zapewniające pokrycie całego obciążenia cieplnego i chłodniczego strefy, kontrolę wilgotności w strefie, wymagania dotyczące powietrza zewnętrznego i inne ograniczenia, jeśli zostały określone. System umożliwia obliczenia zapotrzebowania na ciepło i chłód;

Pętla systemu (ang. PlantLoops) – obiekt konstrukcyjny (pętla) wysokiego poziomu w programie EP. Pętla to przewody/rury, którymi krąży płyn roboczy zaspokajający obciążenia cieplne i chłodnicze stref cieplnych. Jest to połączenie pomiędzy komponentami systemu, zbudowane przy użyciu gałęzi, złącz. W skład pętli wchodzi strona zapotrzebowania i odbioru;

Strona zapotrzebowania (ang. Demand side half-loop) – część pętli (półpętla) zawierającej elementy systemu służące do zaspokojenia zapotrzebowania, np. grzejniki, jednostki grzewcze, chłodzące;

Strona odbioru (ang. Supply side half-loop) – część pętli (półpętla) zawierającej elementy systemu (np. kocioł, agregaty chłodnicze) przetwarzające płyn roboczy w celu dostarczenia płynu roboczego do strony zapotrzebowania;

Gałęzie (ang. Branches) – obiekty konstrukcyjne średniego poziomu w programie EP. Są to segmenty używane do konstruowania pętli. Składają się z węzłów i minimum jednego komponentu;

Obejście Bypass (ang. Bypass Branch) – odgałęzienie każdej ze stron pętli wykorzystywane w przypadku występowania mniejszych obciążeń cieplnych niż projektowe, nadmiarowy przepływ jest kierowany przez to odgałęzienie. Przepływ przez by-pass następuje jedynie w sytuacji, gdy pozostałe gałęzie nie mogą obsłużyć całego przepływu w pętli;

Złącza (ang. Connectors) – obiekty konstrukcyjne średniego poziomu, które służą do łączenia różnych gałęzi w pętlach. Dzieli się na rozdzielacze (ang. Splitter) i łączące (ang. Mixer);

Komponenty (ang. Components) – elementy konstrukcyjne niskiego poziomu w programie EP (np. kocioł, grzejnik). Pompy obiegowe, agregaty chłodnicze, wieże chłodzące stanowią podgrupę komponentów roboczych, a rury i przewody komponentów pasywnych, wspierających;

Węzły (ang. Nodes) – punkty początkowe i końcowe gałęzi i komponentów;

HVACTemplate:Thermostat – obiekt (termostat) programu EP umożliwiający zadanie stałych lub określonych w harmonogramie temperatur ogrzewania i chłodzenia strefy cieplnej dla całej symulacji używany w przypadku systemu idealnego;

ThermostatSetpoint:SingleHeating – obiekt (termostat) programu EP umożliwiający zadanie stałych lub określonych w harmonogramie temperatur wyłącznie ogrzewania używany w przypadku systemu rzeczywistego bez chłodzenia mechanicznego;

ThermostatSetpoint:DualSetpoint – obiekt (termostat) programu EP umożliwiający zadanie stałych lub określonych w harmonogramie temperatur zarówno ogrzewania, jak i chłodzenia używany w przypadku systemu rzeczywistego z chłodzeniem mechanicznym;

ZoneHVAC:Baseboard:RadiantConvective:Water – komponent programu EP odpowiadający wodnemu grzejnikowi centralnego ogrzewania przekazujący ciepło do otoczenia na drodze konwekcji i promieniowania;

ZoneHVAC:WindowAirConditioner – komponent programu EP odpowiadający jednostce klimatyzacyjnej w budynkach mieszkalnych (klimatyzator jednoczęściowy), składający się z komory mieszania, wentylatora i węzownicy chłodzącej z pośrednim odparowaniem;

DaylightingControl – obiekt służący do sterowania oświetleniem w danej strefie w zależności od natężenia promieniowania światła dziennego.

1 Wstęp

W ostatnim czasie w trosce o przyszłe pokolenia coraz większą uwagę zwraca się na ochronę środowiska naturalnego. Jednym z ważnych problemów jest wyhamowanie procesu globalnego ocieplenia tak, aby wzrost temperatury powierzchni Ziemi względem epoki przedprzemysłowej nie przekroczył $1,5^{\circ}\text{C}$. Wg raportu Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (ang. Intergovernmental Panel on Climate Change, w skrócie IPCC) [6] w XXI wieku prognozowana globalna średnia temperatura powierzchni ma wzrosnąć w zakresie od $1,5^{\circ}\text{C}$ do nawet $4,0^{\circ}\text{C}$ [7]. Istotny wpływ na wzrost temperatury ma emisja gazów cieplarnianych. Zgodnie z raportem IPCC [7] gazy cieplarniane spowodowały wzrost globalnej średniej temperatury powierzchni Ziemi o $0,5\text{--}1,3^{\circ}\text{C}$ w okresie 1951–2010 r. Natomiast w najnowszym raporcie IPCC z 2022 roku naukowcy zaznaczają, że tylko znaczna i natychmiastowa redukcja emisji gazów cieplarnianych może ograniczyć wzrost temperatury do $1,5^{\circ}\text{C}$ [8]. W związku z tym konieczne jest podjęcie działań w wielu obszarach (w tym w sektorze budowlanym) mających na celu zredukowanie emisji.

Jednym z głównych celów klimatyczno-energetycznej polityki Unii Europejskiej (UE) jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, w tym ditlenku węgla. W krajach UE do 2030 roku nakłada się wymóg redukcji emisji o 40% w stosunku do 1990 roku. Wśród gazów pochodzenia antropogenicznego to ditlenek węgla w największym stopniu, bo aż w 81%, odpowiada za powiększenie efektu cieplarnianego [9]. Obecnie kraje UE sumarycznie emitują 9% z całkowitej ilości emitowanych gazów cieplarnianych na świecie, czyli są trzecim co do wielkości emitentem, po Chinach i Stanach Zjednoczonych. Natomiast Polska wśród krajów UE zajmuje piąte miejsce [9]. W Polsce zdecydowana większość gazów cieplarnianych pochodzenia antropogenicznego (82%) jest emitowana w sektorze energetycznym, m.in. w trakcie wytwarzania energii elektrycznej [10]. W dużej mierze powstaje ona w wyniku spalania paliw kopalnianych, następstwem czego ogromna ilość ditlenku węgla jest emitowana do atmosfery.

Wg danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) w 2018 roku gospodarstwa domowe były odpowiedzialne za 23% całkowitego zużycia energii w Polsce [11]. W budynkach mieszkalnych energia jest dostarczana głównie na potrzeby ogrzewania, podgrzania wody, przygotowania posiłków i oświetlenia, a w nowszym budownictwie również chłodzenia [12]. Najwięcej energii zużywanej jest na ogrzewanie, w związku z tym projektanci stawiają sobie za cel redukcję zapotrzebowania na ciepło przez np. zwiększenie izolacji cieplnej przegród zewnętrznych budynku oraz jego szczelności. Takie działania mogą przynieść, poza zmniejszeniem zapotrzebowania na ciepło, również negatywne konsekwencje. Z powodu ograniczonej wymiany ciepła i powietrza z otoczeniem w okresie letnim budynek staje się swego rodzaju „termosem”, dochodzi do przegrzewania budynku, co obniża znacząco komfort cieplny. To w konsekwencji może przyczynić się do obniżenia trwałości konstrukcji i materiałów budowlanych, zwiększenia zachorowalności mieszkańców, w tym Syndromu Chorego Budynku (ang. Sick Building Syndrome (SBS)). Osoby chore na SBS często skarżą się na lekkie dolegliwości: ból głowy, duszności, kaszel. Z SBS są związane nie tylko wyżej wymienione, ale również poważniejsze schorzenia, takie jak astma oskrzelowa, zapalenie spojówek i nowotwory [13]. Ze względu na

ocieplający się klimat w kolejnych latach problem może narastać. Z tego powodu uwaga projektantów i audytorów powinna skupiać się nie tylko na okresie zimowym, ale również na zapewnieniu odpowiednich warunków cieplnych w okresie letnim. Najczęściej stosowane do tego celu klimatyzatory powodują wzrost kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych oraz negatywnie wpływają na środowisko z powodu dodatkowej emisji CO₂ związanej z wytworzeniem energii elektrycznej. Alternatywnym rozwiązaniem może być właściwe wykorzystanie potencjału chłodniczego wentylacji naturalnej, co zmniejsza koszty ekonomiczne i środowiskowe.

W związku z tym, że przytoczona tematyka wzbudza zainteresowanie zarówno w naszym kraju, jak i na całym świecie, w ramach pracy doktorskiej postanowiono przeprowadzić studium przypadku, którego celem była analiza porównawcza zużycia energii, emisji ditlenku węgla i kosztów środowiskowych systemów HVAC (ang. Heating, Ventilation and Air-Conditioning) domu jednorodzinnego, w którym stosowane są konwencjonalne i alternatywne sposoby chłodzenia i jednocześnie wyposażonego w różne źródła energii. Z uwagi na to, że zastosowane rozwiązania ogrzewania, chłodzenia i wentylacji mogą w różny sposób wpływać na lokalny komfort cieplny mieszkańców, jednym z zadań w pracy była analiza rozkładu parametrów powietrza w pomieszczeniu w wykorzystaniem metod numerycznej mechaniki płynów CFD (ang. Computational Fluid Dynamics). Tak jak napisano wcześniej, redukcja emisji gazów cieplarnianych jest kluczowa do wyhamowania procesu globalnego ocieplenia, dlatego działanie, jakim może być ograniczenie emisji z gospodarstw domowych, będzie miało istotny wpływ na końcowy efekt.

2 Identyfikacja budynków jednorodzinnych pod względem kształtu, konstrukcji i systemów HVAC

2.1 Rodzaje i kształt

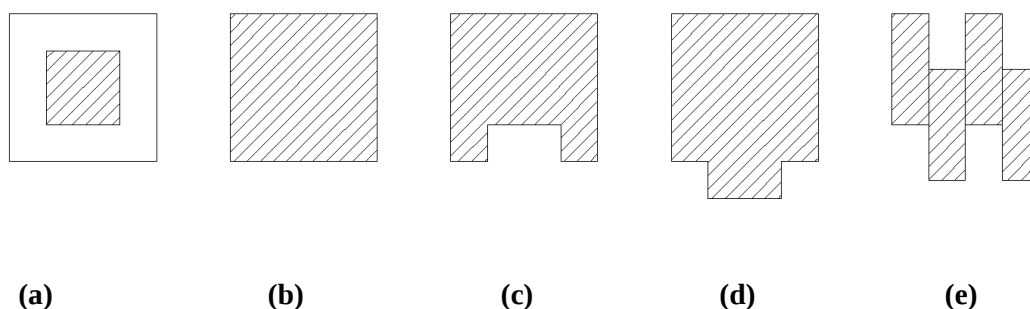
Prawo Budowlane definiuje budynek mieszkalny jednorodzinny jako „budynek wolnostojący albo w zabudowie bliźniaczej, szeregowej lub grupowej, służący zaspokajaniu potrzeb mieszkaniowych, stanowiący konstrukcyjnie samodzielną całość, w których dopuszcza się wydzielenie nie więcej niż dwóch lokali mieszkalnych albo jednego lokalu mieszkalnego i lokalu użytkowego o powierzchni całkowitej nieprzekraczającej 30% powierzchni całkowitej budynku” [14]. Zgodnie z warunkami technicznymi [15] budynek jednorodzinny lub zespół takich budynków wraz z budynkami garażowymi i gospodarczymi składa się na zabudowę jednorodzinną. Natomiast w języku potocznym dom jednorodzinny oznacza budynek zamieszkały najczęściej przez jedną rodzinę bądź dwie i stanowiący odrębną całość.

Poza wymienionymi typami zabudowy w Prawie Budowlanym wyróżnia się zabudowę: atrialną, dywanową, przylegającą, zespołową, skupioną, strukturę płaską i zabudowę o formie maty. Wraz z zabudową grupową powstają one przez połączenie, modyfikacje podstawowych typów zabudów. Najczęściej wybieranym typem zabudowy są domy wolnostojące, cechujące się brakiem wspólnej ściany bądź ścian z innym obiektem. Ich metraż (powierzchnia użytkowa) waha się od kilkudziesięciu metrów kwadratowych do 300 m². Wg danych GUS [16] w pierwszym półroczu 2024 roku średnia powierzchnia mieszkania w budynkach jednorodzinnych wynosiła 131,9 m². Domy mogą być parterowe, piętrowe, z poddaszem użytkowym, z płaskim lub spadzistym dachem, dodatkowo mogą posiadać garaż w bryle budynku bądź być podpiwniczone.

Istotną cechą wyróżniającą dany budynek jest jego kształt. Wyróżnia się budynki o bryle otwartej bądź zamkniętej na otoczenie, wypukłej bądź wklęsłej, jednolitej bądź strukturalnej [17] (Rys. 2.1). Wg badań [18–22] najkorzystniejszymi rozwiązaniami pod względem energooszczędności są budynki o zwartej i prostej bryle, zapewniającej jak najmniejszy stosunek powierzchni przegród zewnętrznych do kubatury budynku, czyli współczynnik kształtu A/V. W taki sposób można istotnie zmniejszyć udział strat ciepła przez przenikanie przez przegrody. W idealnym wariantcie bryła budynku powinna być w formie ściętej kuli lub walca. Jednak w praktyce nie stosuje się takich rozwiązań, dlatego zaleca się, aby kształt budynku był jak najbardziej zbliżony do sześciangu lub prostopadłościanu. Jednakże budynki o zwartej bryle są mało atrakcyjne z punktu widzenia architektonicznego i przyszłych inwestorów, dlatego zaleca się przy projektowaniu wyważyć korzyści oszczędności energii ze względami estetycznymi [18, 23, 24]. Na kształt budynku wpływa również kształt dachu, obecność balkonów, poddasza użytkowego.

Kolejnym elementem typologii budynków jest ich rozmieszczenie w układzie przestrzennym działki. Domy usytuowane blisko siebie tworzą układy zwarte pod względem stopnia zagęszczenia zabudowy, natomiast rozmieszczone w dużych odległościach od siebie, znacznie większych niż podanych w przepisach, tworzą układ rozproszony [17, 25]. Najczęściej układy zwarte i o dokładnym planie rozmieszczenia

budynków można spotkać na nowo projektowanych osiedlach, natomiast większą swobodę zabudowy można zaobserwować na terenach podmiejskich i przy prywatnych inwestycjach. Więcej informacji na temat topologii budynków mieszkalnych jednorodzinnych zawierają publikacje [17, 25].



Rys. 2.1. Rzuty brył budynków: a) zamknięta, b) otwarta, jednolita, c) wklęsła, d) wypukła, e) strukturalna [17]

2.2 Technologie budowy domu

Istotnym aspektem na etapie projektowym domu jest wybór technologii budowy. Obecnie wyróżnia się technologie: m.in. murowaną, domy szkieletowe, domy z bali, domy z prefabrykatów, technologia budowy ze styropianu oraz inne innowacyjne technologie. Decyzja o wyborze technologii jest podyktowana możliwościami finansowymi inwestora, prostotą technologii, zastosowania wybranej technologii na danym terenie czy czasem realizacji budowy oraz trwałością budynku. Kolejnymi czynnikami branymi pod uwagę jest energooszczędność, dźwiękoszczelność, możliwość zapewnienia komfortu cieplnego czy wygoda użytkowania. W Polsce najczęściej wybieraną technologią budowy domu jest technologia murowana, tzw. technologia tradycyjna udoskonalona. Wg danych GUS została ona zastosowana aż w 98,1% nowych budynków mieszkalnych oddanych do użytku w pierwszym półroczu 2024 roku [16]. Konstrukcja budynku powstaje przy użyciu materiałów, tj.: betonu komórkowego, cegieł, silikatów, keramzytobetonu, bloczków wapienno-piaskowych lub pustaków, połączonych ze sobą zaprawami oraz spoinami i jest izolowana najczęściej styropianem bądź wełną mineralną [26]. Budynki cechują się długą trwałością, dobrą zdolnością do akumulacji ciepła i wilgoci, izolacyjnością akustyczną.

Drugą popularną technologią jest technologia domów szkieletowych, tzw. domów kanadyjskich. W pierwszym półroczu 2024 roku oddano do użytku 636 takich domów [16]. W tej technologii konstrukcja budynku oparta jest na drewnianym szkielecie z betonowym fundamentem bądź stropie drewnianym z pustką podłogową. Szkielet budynku składający się z równomiernie rozstawionych drewnianych słupów jest wypełniony wełną mineralną zapewniającą dobrą izolację. W zależności od przyjętej technologii elewacja budynku może być z desek lub sidingu bądź może być położona dodatkowa warstwa izolacji otynkowana na warstwie kleju zbrojonego z siatką. W takim przypadku wizualnie domy

kanadyjskie nie różnią się zbyt od domów wykonanych w technologii tradycyjnej. Wśród wad takich rozwiązań są niewielka izolacyjność akustyczna, słaba akumulacja ciepła powodująca szybkie wychładzanie bądź nagrzewanie się budynku oraz istnienie ryzyka zniszczenia budynku pod wpływem silnego wiatru [27, 28].

Inną technologią opierającą się na drewnie są domy z bali. Konstrukcja ścian składa się z drewnianych bali oraz warstwy izolacji (wełny szklanej, wełny mineralnej, włókien celulozowych oraz wełny drzewnej) zapewniającej wymagany współczynnik przenikania ciepła U . Ściany wewnętrzne mogą być dodatkowo wyłożone płytą g-k i otynkowane bądź pokryte drugą warstwą bali [29]. W takich budynkach łatwiej jest zapewnić komfort cieplny mieszkańcom, ponieważ ściany budynku wykonane z solidnego drewna zapewniają dobrą akumulację ciepła. Dodatkowo przebywanie w takich domach jest zdrowe [28].

Kolejnym rozwiązaniem, rozpowszechnionym głównie w zachodniej Europie, są domy wykonane z prefabrykatów betonowych. Prefabrykaty są to gotowe moduły budynku: ściany, stropy czy schody przygotowane w fabryce. Prefabrykaty mogą być wykonane ze stosunkowo lekkiego betonu komórkowego lub zbrojonego keramzytobetonu o bardzo dobrych parametrach izolacyjnych i wytrzymałościowych. W niektórych technologiach instalacje budynku są już wtopione w prefabrykowane elementy, dlatego po złożeniu budynku wykonywany jest tylko biały montaż. Takie budynki cechują się długą żywotnością, dobrą ognioodpornością, izolacyjnością cieplną i akustyczną.

Innym ciekawym rozwiązaniem jest technologia budowy domu z elementów styropianowych wypełnionych betonem zapewniającym sztywność konstrukcji. Pustaki styropianowe wykonane są z twardego styropianu, niełatwopalnego, odpornego na wilgoć i czynniki biologiczne; ich grubość mieści się w zakresie od 25 cm do 45 cm, przy czym warstwa betonu ma 15 cm. Dla ścian o grubości 35 cm współczynnik przenikania ciepła U wynosi $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, co daje znaczną przewagę w porównaniu do murowanych domów [30]. O krok dalej poszła polska firma „M3 System” [31] budująca konstrukcję nośną jedynie z elementów polistyrenu spienionego wzmocnionego siatką z włókna szklanego, jedynie ściana szczytowa budynku jest wykonana w technologii murowanej. Fundament budynku składa się z podwójnie zbrojonej, żelbetonowej płyty fundamentowej, pod którą znajduje się styropian. W obydwu przypadkach elewacja zewnętrzna jest wykończona w podobny sposób jak w pozostałych budynkach. Do wad takich rozwiązań zalicza się słabą akumulacyjność budynku, co powoduje potrzebę stosowania ogrzewania w sposób stały w znacznym okresie w ciągu roku, konieczność zastosowania wentylacji mechanicznej ze względu na ryzyko gromadzenia się wilgoci na ścianach budynku, niezbyt dobrą dźwiękoszczelność oraz konieczność wykonania bryły budynku w krótkim czasie ze względu na negatywny wpływ promieniowania słonecznego na styropian [30].

2.3 Systemy HVAC

Wraz ze wzrostem zamożności społeczeństwa coraz więcej ludzi decyduje się na budowę domu. Od kilku lat obserwuje się gwałtowny wzrost liczby wybudowanych domów. W 2021 roku na terenie Polski oddano do użytkowania 109 212 budynków mieszkalnych

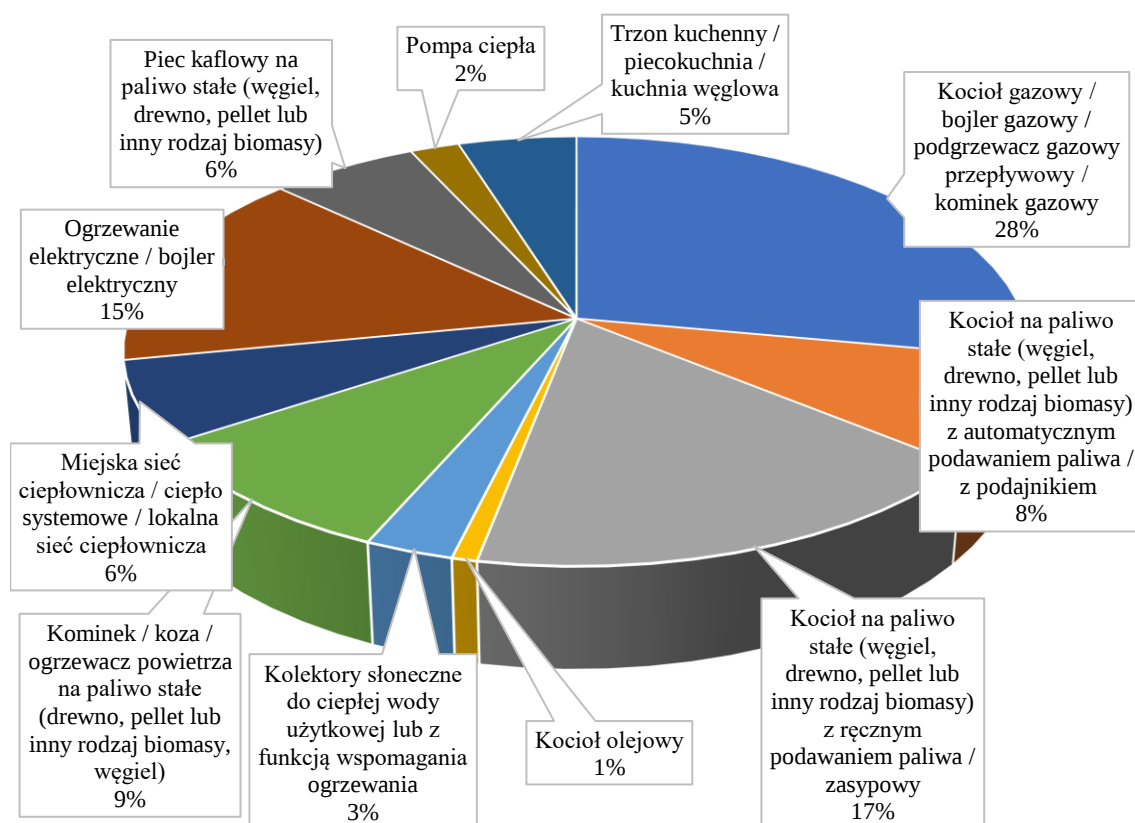
jednorodzinnych, dla porównania w 2015 roku było blisko o połowę mniej 68 133 [32, 33]. Natomiast w ostatnich latach 2022–2024 nastąpił kryzys w sektorze budownictwa. Był on spowodowany m. in. wybuchem wojny na Ukrainie, brakiem płynności w dostawie towarów budowlanych, wysoką inflacją czy podwyżkami cen energii. Pomimo tego wciąż oddawanych do użytkowania nowych domów jest wiele, w pierwszym kwartale 2024 oddano ich 41 043. Co optymistyczne – wzrosła liczba wydanych pozwoleń na budowę dla budynków jednorodzinnych o 21% w stosunku do roku 2023 [16]. Każdy z tych budynków jest wyposażony w systemy ogrzewania, wentylacji, podgrzewania ciepłej wody, oświetlenia, a w nowoczesnych budynkach klimatyzacji. Głównym zadaniem systemów HVAC powinno być zapewnienie wysokiej efektywności energetycznej budynku przy jednoczesnej minimalizacji ponoszonych strat środowiskowych. Dlatego projektanci kładą coraz większy nacisk na rozwiązania energooszczędne, w tym pasywne ograniczające lub eliminujące zużycie energii, tym samym emisję gazów cieplarnianych do atmosfery. Obecnie wyróżnia się tradycyjne (aktywne) systemy HVAC, do których działania potrzebna jest nieodnawialna energia pierwotna dostarczana z zewnątrz w postaci paliwa czy energii elektrycznej oraz systemy pasywne, w których pozyskanie energii odbywa się w sposób bierny.

2.3.1 Ogrzewanie

W 2018 roku wg danych GUS [34] w ponad 40% wszystkich mieszkań systemy ogrzewania były zasilane ciepłem z sieci. W przypadku gospodarstw domowych posiadających własne źródło ciepła przeważały dwufunkcyjne kotły na paliwa stałe lub gaz ziemny (28,9%). Wg raportu z badań realizowanych na ogólnopolskiej reprezentatywnej próbie właścicieli budynków jednorodzinnych [35] w większości źródłem ciepła był kocioł węglowy (51%), na drugim miejscu znalazł się kocioł gazowy (24%), na trzecim kocioł na drewno (13%), natomiast ogrzewanie elektryczne bądź pompa ciepła były instalowane jedynie w 2% wszystkich domów. Jednak należy wziąć pod uwagę, że badania dotyczyły szerokiego spektrum domów jednorodzinnych nie tylko wybudowanych wg najnowszych standardów. Od 1 lipca 2021 r. do 30 czerwca 2022 r. odbył się obowiązkowy spis wszystkich źródeł ciepła o mocy do 1 MW, wykorzystywanych do ogrzewania w budynkach mieszkalnych (92%) oraz niemieszkalnych, np. usługowych (8%), realizowany przez Centralną Ewidencję Emisyjności Budynków (CEEB). Jego głównym celem była poprawa jakości powietrza przez likwidację głównej przyczyny zanieczyszczeń – emisji substancji powodujących smog [36]. Po przeprowadzonym spisie CEEB na bieżąco aktualizuje dane. Na Rys. 2.2 przedstawiono strukturę źródeł ciepła opracowaną na podstawie danych zebranych przez CEEB do 30 września 2024 roku, w której ponad 50% wszystkich źródeł ciepła stanowiły: kocioł gazowy (28%) oraz kocioł na paliwa stałe (25%). Natomiast bazując na wiedzy ze środowiska projektowego aktualnie coraz częściej inwestorzy nowych domów jednorodzinnych decydują się na kocioł gazowy kondensacyjny współpracujący z zasobnikiem ciepłej wody użytkowej lub pompę ciepła czy kocioł na biomasę. Wzrasta szczególnie popularność dwóch ostatnich odnawialnych źródeł ciepła ze względu na wsparcie finansowane w ramach programów rządowych, tj. „czyste powietrze”. Wg danych Polskiej Organizacji Rozwoju Technologii Pomp Ciepła (PORT PC) [37] w 2023 roku udział pomp ciepła w sprzedaży urządzeń grzewczych do domów

jednorodzinnych wyniósł 44%, a kotłów gazowych w przybliżeniu 40% [38]. Wg danych PORT PC od 2018 roku sprzedaż pomp ciepła typu powietrze/woda była bardzo wysoka w porównaniu z pozostałymi źródłami ciepła do domów jednorodzinnych. Szczytowy wynik sprzedaży odnotowano w 2022 r., kiedy to wyniósł 92% wśród wszystkich zakupionych urządzeń grzewczych. Aktualnie ich sprzedaż spadła na korzyść źródeł ciepła zasilanych innymi paliwami ze względu m.in. na gwałtowny wzrost energii elektrycznej [38]. Najczęściej spotykanym systemem ogrzewania w domach jednorodzinnych jest ogrzewanie wodne podłogowe i grzejnikowe. Zdecydowanie rzadziej spotykane są rozwiązania ogrzewania elektrycznego. Stosuje się je w przypadku domów, głównie pasywnych, wyposażonych w panele fotowoltaiczne.

Istotnym elementem brany pod uwagę przy projektowaniu energooszczędnych budynków jest spełnienie obowiązujących regulacji prawnych [15] odnośnie do izolacji przegród budowlanych. Przykładowo od 1 stycznia 2021 roku wartość współczynnika przenikania ciepła U dla ścian zewnętrznych nie może przekroczyć $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, a dla okien $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Rys. 2.2. Struktura źródeł ciepła w Polsce stosowanych w budownictwie mieszkalnym i niemieszkalnym – dane CEEB (stan na 30.09.2024) [39]

2.3.2 Wentylacja

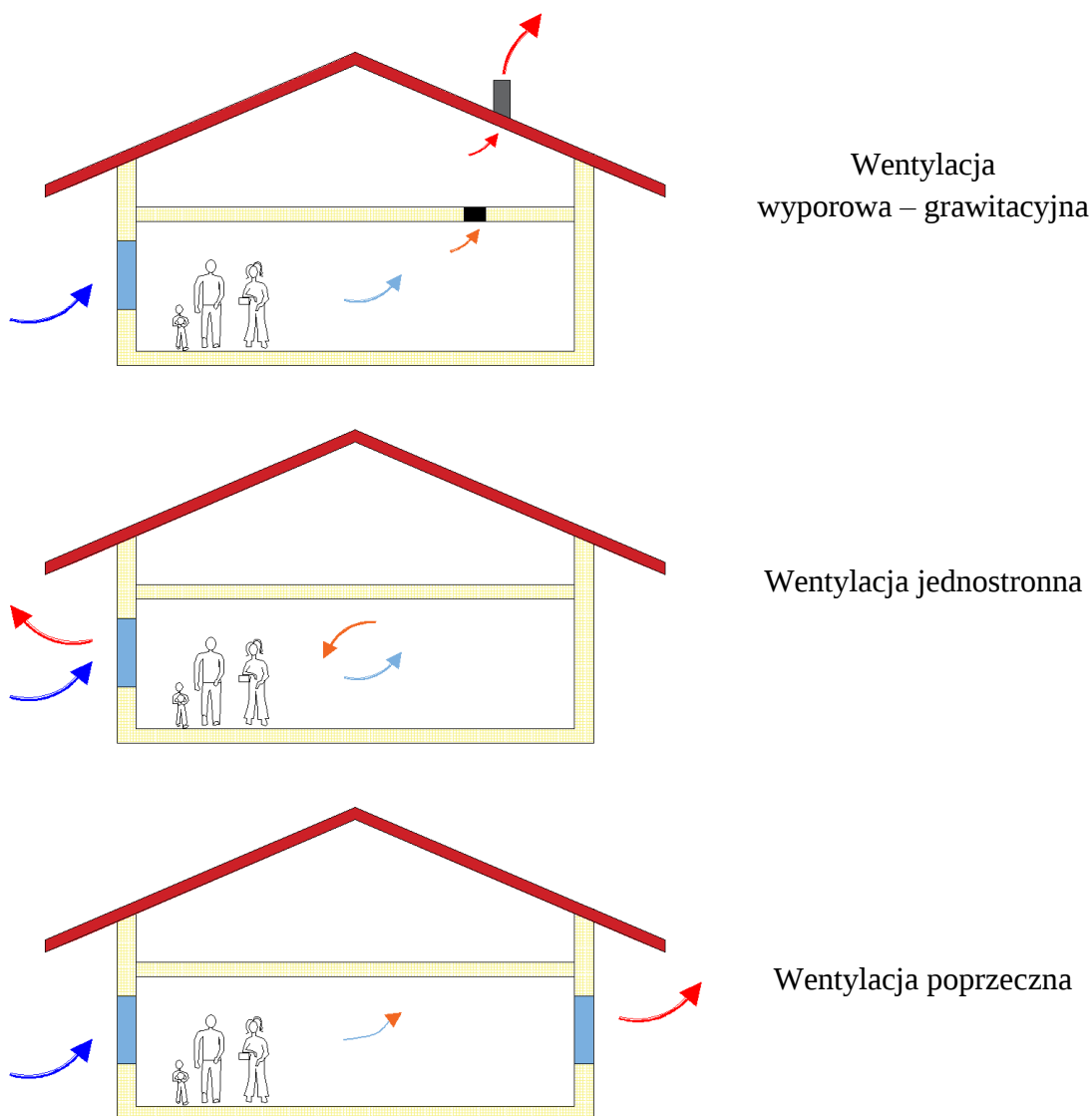
W przypadku wentylacji w budownictwie mieszkalnym jednorodzinnym inwestorzy decydują się na zastosowanie wentylacji naturalnej – grawitacyjnej bądź mechanicznej wywiewnej, nawiewnej, nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła lub bez odzysku. Przy wyborze systemu biorą pod uwagę kwestie finansowe, energooszczędne oraz możliwości

wykonania danego rozwiązania. Najczęściej stosowanym w Polsce systemem ze względu na niskie koszty w budynkach mieszkalnych jest system naturalny grawitacyjny [40]. System ten nie zapewnia praktycznie żadnej kontroli nad strumieniem objętości powietrza, co może powodować brak odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego, szczególnie w okresie zimowym, oraz zbyt wysoką temperaturę w okresie letnim czy powstawanie przeciągu [41]. Efektywność wentylacji naturalnej zależna jest od szeregu czynników, takich jak prędkość wiatru, różnica temperatury pomiędzy powietrzem zewnętrznym a wewnętrznym, wilgotność powietrza, parametry charakteryzujące budynek (usytuowanie, liczba okien, szczelność obudowy) oraz zachowanie użytkowników [42, 43]. Biorąc pod uwagę zmienność przypadków, w domach jednorodzinnych można wyróżnić trzy rodzaje wentylacji naturalnej (Rys. 2.3) [44, 45]:

- Wentylacja jednostronna – występuje, gdy otwory wentylacyjne (okna) znajdują się tylko na jednej stronie budynku lub w pojedynczym pomieszczeniu przy zamkniętych drzwiach. Z tego względu przepływ powietrza jest ograniczony, pojawia się głównie w pobliżu okien; w okresie letnim jest wywołany naporem wiatru, a w okresie zimowym wyporem termicznym. W zależności od różnicy między temperaturą powietrza zewnętrznego i wewnętrznego strumień powietrza infiltrującego wpływa przez jedną część szczeliny (np. dolną, gdy temperatura zewnętrzna jest niższa niż wewnętrzna), a wypływa przez drugą (w tym przypadku górną);
- Wentylacja poprzeczna – występuje, gdy otwory wentylacyjne zlokalizowane są przynajmniej po dwóch przeciwległych ścianach budynku lub w pojedynczym pomieszczeniu z otwartymi drzwiami. W tym przypadku strumień powietrza zewnętrznego wpływa do pomieszczenia jednym oknem, przepływa przez budynek i wypływa innym otworem wentylacyjnym. Kierunek i wielkość przepływu powietrza jest uzależniona od siły naporu wiatru;
- Wentylacja wyporowa – grawitacyjna (kominowa) – występuje, gdy otwory wentylacyjne znajdują się na różnej wysokości budynku. W sytuacji prawidłowej strumień powietrza zewnętrznego wpływa do budynku przez dolne otwory wentylacyjne (okna), a wypływa przez górne otwory (kominy). Efektywność systemu jest zależna od wyporu termicznego i układu pomieszczeń wraz z rozmieszczeniem otworów wentylacyjnych [41].

Wymagania dla wentylacji w budynkach mieszkalnych zawarte są w trzech aktach prawnych: w Warunkach Technicznych [15], w normie PN-83/B-03430/Az3:2000 [46] oraz normie PN-EN 16798-1:2019 [47]. Pierwsze dwa akty prawne dotyczą wymagań technicznych przy projektowaniu wentylacji, natomiast ostatnią normę stosuje się do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków m.in. w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego i środowiska ciepłego. W związku z tym w przytoczonych aktach prawnych mogą pojawiać się różnice co do wytycznych projektowych. Przykładowo norma [46] określa minimalny strumień powietrza zewnętrznego doprowadzonego do pomieszczeń w budynkach mieszkalnych, który w zależności od ich przeznaczenia powinien wynosić co najmniej od 15 m³/h do 70 m³/h. Według Warunków Technicznych wielkość strumienia powietrza nawiewanego powinna

być określona zgodnie z normą [46] oraz ma odpowiadać wielkości powietrza usuwanego i nie może być mniejsza niż $20 \text{ m}^3/\text{h}$ na mieszkańca w danym pomieszczeniu. Natomiast zgodnie z normą PN-EN 16798-1:2019-06 [47] wielkość strumienia powietrza powinna wynosić minimalnie od $14,4 \text{ m}^3/\text{h}$ do $36,0 \text{ m}^3/\text{h}$ na osobę w zależności od kategorii środowiska wewnętrznego.



Rys. 2.3. Schematy wentylacji naturalnej [44, 45]

Ze względu na niską skuteczność wentylacji naturalnej (szczególnie w okresie letnim) często inwestorzy decydują się na systemy mechaniczne bądź rozwiązania hybrydowe, zapewniające kontrolę nad strumieniem świeżego powietrza wpływającym do pomieszczenia oraz usunięcie z niego zanieczyszczonego powietrza [48]. Wśród urządzeń wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej najczęściej znajdują się wentylatory, nagrzewnice, chłodnice i rekuperator. Wg danych BuildDesk w 2014 roku 3,9% nowych domów jednorodzinnych było wyposażonych w system wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła [49]. Natomiast wg badań zebranych przez GUS w 2018 roku prawie

10% procent gospodarstw domowych miało systemy mechaniczne, ale w tym przypadku wzięto pod uwagę nie tylko budownictwo jednorodzinne. Dodatkowym wspomaganie pracy wentylacji i ogrzewania są gruntowe wymienniki ciepła. Jak pokazują badania [50], zamontowanie centrali wentylacyjnej wraz z rekuperatorem i gruntowym wymiennikiem ciepła pozwala obniżyć zapotrzebowanie na energię pierwotną o ponad 20% w porównaniu z wentylacją grawitacyjną. Jednak takie rozwiązania wymagają zdecydowanie większych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych o około kilkanaście tysięcy złotych.

2.3.3 Chłodzenie

Ze względu na coraz dłuższe okresy w ciągu roku wymagające chłodzenia budynku, w celu zapewnienia komfortu cieplnego mieszkańców, coraz częściej w domach jednorodzinnych są stosowane urządzenia klimatyzacyjne. Wg danych GUS w 2018 roku 2,8% gospodarstw domowych było wyposażonych w urządzenia klimatyzacyjne [34], w porównaniu do 2009 roku zaobserwowano 8-krotny wzrost [51]. Zaobserwowano również wzrost zainteresowania montażem klimatyzacji centralnej (np. typu MultiSplit), zamiast pojedynczych jednostek klimatyzacyjnych typu Split. Podobnie jak w pozostałych obszarach branży HVAC w 2021 roku odnotowano największy wynik sprzedaży urządzeń klimatyzacyjnych, stanowiący ponad połowę całego zysku [52]. W budynkach mieszkalnych najczęściej spotykane są trzy rodzaje urządzeń: wentylatory, pompy ciepła (sprężarkowe i absorpcyjne) i chłodnice z bezpośrednim odparowaniem [53]. Częstym wyborem są jednostki ściennie ze względu na łatwość montażu i kompaktowe rozmiary. Najczęściej są one montowane w pomieszczeniach o dużych zyskach ciepła, np. w kuchni i salonie czy pomieszczeniach sypialnych, w których zapewnienie dobrych warunków środowiska wewnętrznego jest szczególnie istotne. Decyzja o instalacji systemu chłodzenia powoduje wzrost kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych oraz negatywnie wpływa na środowisko zewnętrzne z powodu dodatkowej emisji CO₂, związanej z wytworzeniem energii elektrycznej. W krajach rozwiniętych chłodzenie może odpowiadać za ponad połowę zużycia energii elektrycznej w jednym mieszkaniu [53]. Biorąc pod uwagę prognozowane ocieplenie klimatu, w przyszłości może to powodować jeszcze większe koszty. Alternatywnym rozwiązaniem dla klasycznej mechanicznej klimatyzacji (metody aktywnej) jest stosowanie metod chłodzenia pasywnego, polegających na wykorzystaniu naturalnego chłodu powietrza zewnętrznego. Zagadnienie to zostało opisane w rozdziale 3.

3 Aktualny stan wiedzy

Zgodnie z ustawą [54] efektywność energetyczna jest to: „stosunek uzyskanej wielkości efektu użytkowego danego obiektu, urządzenia technicznego lub instalacji, w typowych warunkach ich użytkowania lub eksploatacji, do ilości zużytej energii przez ten obiekt, urządzenie techniczne lub instalację, albo w wyniku wykonanej usługi niezbędnej do uzyskania tego efektu”. Podstawowym wskaźnikiem określającym energooszczędność budynku jest jego charakterystyka energetyczna. Na jej podstawie można dokonać podziału domów jednorodzinnych od budynków tradycyjnych, przez energooszczędne do zeroenergetycznych czy nawet plusenergetycznych. Klasyfikacja może być określona na podstawie obliczonych wskaźników energii użytkowej, końcowej i pierwotnej.

Jeszcze niedawno obniżenie zużycia energii, które przekłada się na obniżenie kosztów eksploatacyjnych budynku, było jedynym pożądanym efektem. Obecnie efektywność energetyczna (a przynajmniej powinna być) rozpatrywana łącznie z efektywnością środowiskową rozumianą z jednej strony jako wpływ na warunki środowiska wewnątrz budynków (na przykład poprawa jakości powietrza i warunków cieplnych), a z drugiej strony jako wpływ na środowisko zewnętrzne (głównie efekt w postaci zmniejszenia śladu węglowego).

Wybór systemów ogrzewania, chłodzenia i wentylacji będzie miał kluczowe znaczenie dla uzyskania pożądanego efektu energetycznego i środowiskowego. W ramach niniejszej pracy doktorskiej analizowane będzie zużycie energii związane z każdym z tych systemów, jednak głównym celem będzie ocena skuteczności przede wszystkim chłodzenia pasywnego, dlatego w tej części pracy na początku skupiono się na przeglądzie najnowszych badań dotyczących efektywności pasywnego chłodzenia budynków zarówno pod kątem zużycia energii przez budynek, jak i komfortu cieplnego mieszkańców. Następnie zwrócono uwagę na problem oceny energetycznej budynków w dobie zmian klimatu. Trzecie zagadnienie poruszane w tej części pracy to analiza kosztów środowiskowych w kontekście użytkowania systemów ogrzewania, chłodzenia i wentylacji budynków.

3.1 Pasywne sposoby chłodzenia budynków

Metody pasywne chłodzenia budynków polegają na wykorzystaniu technologii lub cech projektowych budynku w celu obniżenia temperatury powietrza wewnętrznego w okresie letnim przy minimalnym zużyciu energii lub całkowicie bez jej zużycia. Obecnie zaleca się, aby energia dostarczana do zasilania systemu pochodziła z odnawialnych źródeł energii [53, 55, 56]. W metodach aktywnych wykorzystuje się urządzenia mechaniczne do zaspokojenia potrzeb chłodniczych, których nie zapewnia natura. Wśród metod pasywnego chłodzenia budynku wyróżnia się techniki: zapobiegające i ograniczające zyski ciepła, akumulujące i modulujące ciepło umożliwiające modyfikacje zysków ciepła (materiały zmiennofazowe), rozpraszające ciepło (usuwanie ciepła wewnętrznego) [57]. W pracy Geethe i Velraj [55] autorzy dokonali klasyfikacji metod pasywnego chłodzenia budynków

energooszczędnych uwzględniającej, które z nich wykorzystują magazynowanie ciepła (Rys. 3.1).

Pierwsza grupa technik skupia się na ograniczeniu wewnętrznych zysków ciepła w celu poprawy efektywności technik pasywnego chłodzenia budynku. Jest podzielona na dwa zasadnicze obszary: mikroklimat otaczający budynek i ochronę przeciwsłoneczną. Na mikroklimat budynku ma wpływ jego usytuowanie względem padania promieniowania słonecznego i oddziaływania wiatru, a także samo otoczenie. Budynek powinien być tak umiejscowiony, aby uzyskać warunki dla działania pasywnego chłodzenia np. przez pozyskanie jak najchłodniejszego powietrza zewnętrznego w okresie letnim. Do tego celu stosuje się odpowiednie techniki kształtowania krajobrazu z wykorzystaniem roślinności i powierzchni wodnych, szczególnie dla mocno zabudowanych obszarów miejskich. Ochrona przeciwsłoneczna budynku obejmuje zastosowanie stałych i nastawnych elementów zacieniających (zacienienie), okien o niskiej przepuszczalności energii słonecznej (oszklenie, izolacja). Do elementów ochrony przeciwsłonecznej zalicza się elementy w otoczeniu budynku takie jak: drzewa, inne budynki, ukształtowanie terenu i z nim integrowane, np. ściany zacieniające, rolety, wysunięte okapy dachowe [58]. Ważnym czynnikiem ograniczającym przedostawanie się promieniowania słonecznego jest właściwy wybór rozmiaru okna, jego możliwości otwarcia oraz zorientowania względem stron świata (szczelina).

Drugą grupę metod pasywnego chłodzenia stanowią techniki modyfikujące zyski ciepła przez zastosowanie materiałów zmiennofazowych PCM (ang. Phase Changing Materials) [55] lub wentylacji nocnej. Materiał PCM jest to związek międzyfazowy lub materiał przemiany fazowej zdolny do absorbowania, akumulowania i uwalniania dużej ilości ciepła w określonej temperaturze przemiany fazowej. Energia jest pochłaniana lub uwalniana, gdy materiał zmienia swoją fazę ze stałej w ciekłą lub z ciekłej w stałą [59]. Dzięki temu materiały zmiennofazowe zawarte przeważnie w przegrodach budynku pochłaniają i magazynują ciepło w ciągu dnia, zapobiegając nadmiernemu wzrostowi temperatury i zmniejszając obciążenie chłodnicze, a oddając je w okresie nocnym. Wentylacja nocna (przewietrzanie nocne) polega na znacznym schłodzeniu powietrzem zewnętrznym budynku w nocy, tak aby obniżyć temperaturę wewnętrzną oraz wewnętrznych powierzchni przegród budynku. Zmagazynowany chłód może znacząco ograniczyć potrzebę chłodzenia budynku w ciągu dnia [55].

Trzecią grupę stanowią techniki rozpraszające ciepło obejmujące wentylację naturalną, chłodzenie naturalne z magazynowaniem ciepła lub bez niego. Chłodzenie naturalne odnosi się do wykorzystania naturalnych nośników ciepła (radiatorów) do odprowadzania nadmiaru ciepła z pomieszczenia, może być realizowane przez chłodzenie wyparne, wymienniki gruntowe, chłodzenie radiacyjne oraz zastosowanie systemu opartego na materiałach PCM do tzw. free coolingu (darmowego chłodu). Chłodzenie wentylacją naturalną może się odbywać przez jednostronny nawiew powietrza zewnętrznego, wentylację poprzeczną, wentylację wyporową – grawitacyjną, zastosowanie energii słonecznej do wzmocnienia ciągu powietrza w oszklonym kominie (kominy słoneczny) czy użycie ściany Trombe’a [55]. Takie rozwiązania umożliwiają wykorzystanie naturalnego

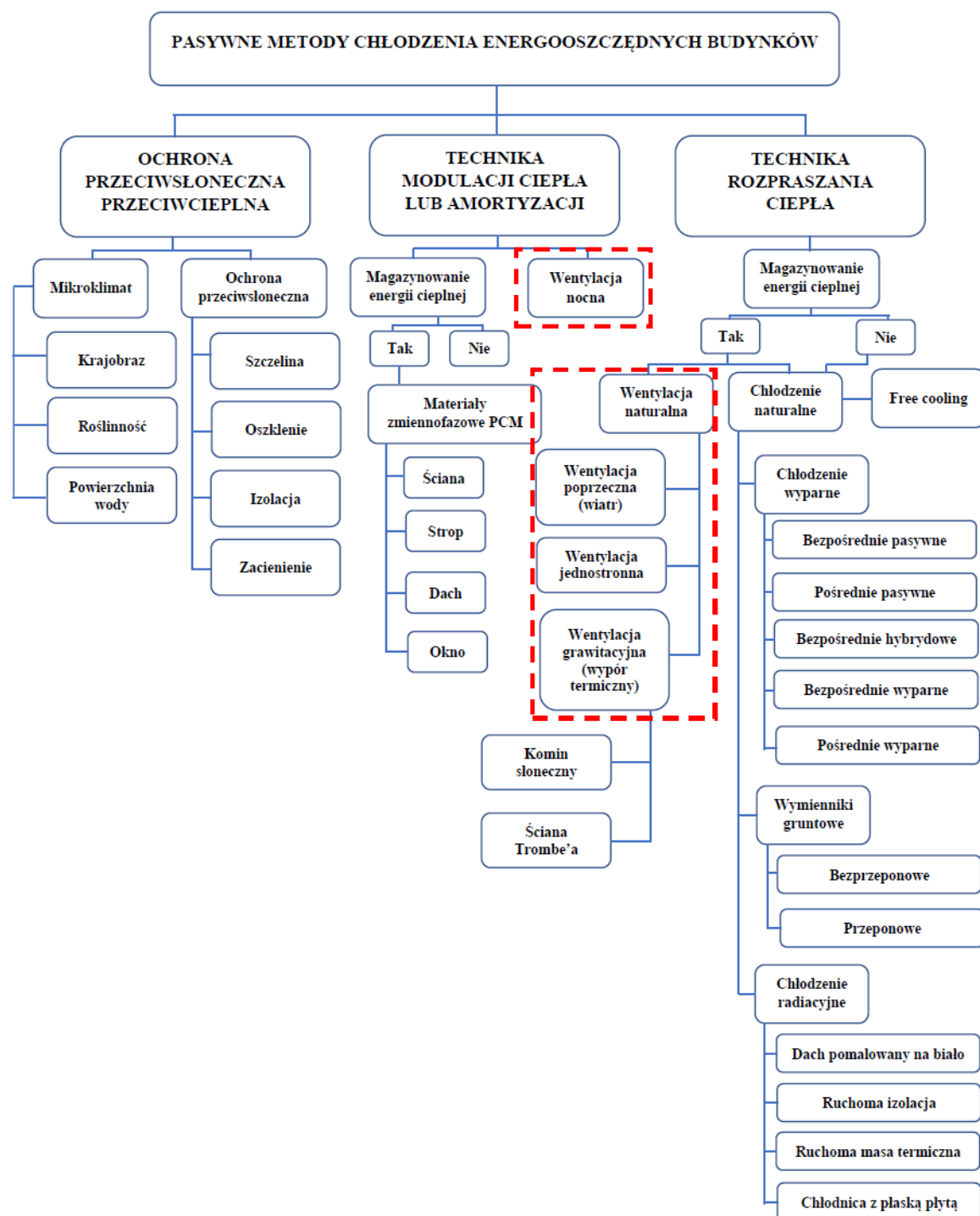
chłodu powietrza zapewnionego przez klimat bez konieczności zużywania dodatkowej energii na chłodzenie. Strumień powietrza może dopływać do pomieszczeń w budynku naturalnie (przez otwarte okna) lub może być wymuszony za pomocą wentylatorów. Istnieją również rozwiązania mieszane (hybrydowe), które polegają na wykorzystaniu zarówno pasywnych, jak i mechanicznych systemów chłodzenia w celu uzyskania warunków komfortu cieplnego przez cały rok. Dostępne są też systemy, w których pasywne chłodzenie wykorzystujące proces wentylacji naturalnej odbywa się tylko przez część doby, kiedy temperatura powietrza zewnętrznego mieści się w odpowiednim zakresie do chłodzenia pomieszczeń np. w nocy.

Każda z tych metod poza ograniczeniem zużycia energii i zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko niesie też ze sobą pewne koszty (inwestycyjne, eksploatacyjne, utrzymania) zredukowane przez oszczędność kosztów pobierania energii. Wg badań przy właściwym podejściu do zastosowania metod pasywnych można osiągnąć oszczędności kosztów w całym cyklu życia na poziomie 52% [60]. W publikacji Songa [60] zamieszczono przegląd metod pasywnych pod kątem ekonomicznym.

Celem przeglądu zawartego w tej pracy nie jest szczegółowe omówienie wszystkich technik, a skupienie się na wykorzystaniu pasywnego wentylacyjnego chłodzenia powietrzem doprowadzonym z zewnątrz (wentylacją naturalną). Obszar zainteresowania zaznaczono na Rys. 3.1.

Potencjał energooszczędności stosowania wentylacji naturalnej jako metody chłodzenia znajduje odzwierciedlenie w wielu publikacjach na ten temat [61-71]. Mirakholi [61] przeprowadził symulację skuteczności wentylacji naturalnej w budynku mieszkalnym w Teksasie w San Antonio (budynek parterowy o łącznej powierzchni 94 m²); obliczenia wykonano w programie EnergyPlus. Okazało się, że zużycie energii elektrycznej w budynkach klimatyzowanych z wentylacją naturalną może być o 20% niższe niż w budynkach bez wentylacji naturalnej. Najlepsze wyniki uzyskano w kwietniu i listopadzie, nawet do 50% oszczędności energii. W pracy Daniela [62] zbadano praktyki chłodzenia w gospodarstwach domowych z przeważającą wentylacją naturalną. Analizy były prowadzone dla 20 budynków mieszkalnych zlokalizowanych w Australii. W odpowiedzi na gorące i wilgotne warunki mieszkańcy stosowali szereg zachowań adaptacyjnych, w tym dostosowanie ubioru, funkcjonowania mieszkania czy obniżenie temperatury ciepła dzięki pływaniu w basenie. Oprócz tego prawie zawsze korzystali z wentylacji naturalnej, w tym przez 50% czasu w ciągu roku dodatkowo były uruchomione wentylatory sufitowe w celu poprawy jej efektywności. Ze względu na wysoką wilgotność powietrza i problemy zdrowotne mieszkańcy w ograniczony sposób korzystali z klimatyzacji, średnio przez 0,7% czasu, nawet kosztem wyższej temperatury w pomieszczeniach. Otrzymane wyniki mają w przyszłości zostać wykorzystane do opracowania profili zachowań mieszkańców w celu ulepszenia modeli symulacyjnych budynków znajdujących się w klimacie ciepłym i wilgotnym. W pracy Oropeza-Pereza i Østergaarda [66], jak i w pracy Rajiego [67] zbadano potencjalne oszczędności energii przez zastosowanie wentylacji naturalnej dla budynków biurowych zlokalizowanych w klimacie umiarkowanym Europy. Obie prace potwierdziły wysoką skuteczność

wentylacji naturalnej jako sposobu pasywnego chłodzenia, przez 90% czasu wentylacja zapewniała warunki komfortu w badanych budynkach. Kompleksowy przegląd badań na temat korzyści stosowania wentylacji naturalnej, tj. poprawy jakości powietrza wewnętrznego, efektywności energetycznej i komfortu cieplnego, przedstawiono w pracy Sakiyama [68].



Rys. 3.1. Klasyfikacja metod chłodzenia pasywnego wg Geethe i Velraj [55]

W 2013 r., w ramach programu International Energy Agency Energy in Buildings and Communities (IEA EBC), powstał projekt dotyczący zagadnień chłodzenia wentylacyjnego (ang. ventilative cooling (VC)) [72], czyli zastosowania wentylacji do chłodzenia powietrzem zewnętrznym w celu zmniejszenia lub nawet wyeliminowania obciążeń związanych z chłodzeniem i/lub zużycia energii przez chłodzenie mechaniczne w budynkach przy jednoczesnym zapewnieniu warunków komfortu cieplnego. Głównym celem było opracowanie metod projektowania i narzędzi związanych z przewidywaniem, oceną i eliminacją potrzeby chłodzenia i ryzyka przegrzewania budynków, a także przygotowaniem energooszczędnych rozwiązań chłodzenia w budynkach. W ramach projektu przeprowadzono analizę efektywności stosowania chłodzenia wentylacyjnego w 91 istniejących budynkach o różnym przeznaczeniu, w przeważającej większości biurowych (55%), zlokalizowanych w 11 europejskich państwach. Wśród analizowanych budynków jedynie 8% stanowiły budynki mieszkalne, w większości pasywne i wyposażone w inteligentne rozwiązania sterowania systemami HVAC [73]. Efekty prac można znaleźć w publikacjach [73-82]. Analizy potwierdziły zasadność stosowania wentylacji naturalnej jako sposobu chłodzenia, ale głównie w połączeniu z konwencjonalnym chłodzeniem mechanicznym. Zespół badawczy także podkreślił dużą niejednorodność analizowanych przypadków, przez którą istnieje trudność z wyciągnięciem ogólnych rekomendacji dla projektantów. Charakterystyka każdego przypadku cechowała się dużą odmiennością i koniecznością dostosowania podejścia do konkretnego klimatu, sposobu użytkowania budynku, typu budynku i wymagań użytkowników. Zaznaczono również potrzebę przeprowadzania wiarygodnych symulacji budynku na etapie projektowym systemów chłodzenia wentylacyjnego w celu dostosowania odpowiedniego systemu dla danego budynku [75].

Wśród metod pasywnego chłodzenia najtańszą i najprostszą jest chłodzenie przez otwieranie okien, szczególnie w przypadku sterowania przez mieszkańców [75]. To zagadnienie zostało poruszone w wielu publikacjach, na przykład [83-89]. Aby osiągnąć wysoką wydajność chłodzenia przy wykorzystaniu wyłącznie naturalnej wentylacji, co skutkuje dużą oszczędnością energii, okna należy otwierać prawidłowo. Dzięki temu możliwe jest korzystanie z darmowego chłodu przez maksymalny okres roku przy jednoczesnym zapewnieniu komfortu użytkownikom. Grygierek i in. [87] zaproponowali optymalne czasy otwierania okien przez mieszkańców pod kątem zapewnienia komfortu przez największą liczbę godzin w ciągu roku i przy jak najmniejszym zapotrzebowaniu na ciepło. Do oceny komfortu wykorzystano model adaptacyjny, w którym oczekiwana temperatura komfortowa jest uzależniona od temperatury powietrza na zewnątrz budynku [90], a do zamodelowania wentylacji wykorzystano model infiltracji w oparciu o metodę „Infiltration by Effective Leakage Area” (ELA). Yin i in. [82] stworzyli model przewidywania efektywności wentylacji naturalnej poprzecznej do chłodzenia pomieszczenia; sprawdzono w nim wpływ wielkości otwarcia okna, jego orientacji i rozmiaru. Z kolei w pracy Krzaczk i in. [89] zbadano efektywność wentylacji grawitacyjnej na warunki mikroklimatu w budynku mieszkalnym zlokalizowanym w północnej Polsce przy zastosowaniu modelu wentylacji jednostronnej realizowanej przez uchylone obrotowe okno.

Drugim sposobem otwierania okien jest automatyczne otwieranie przy użyciu siłowników. Ich szczegółowa symulacja działania jest elementem koniecznym do prawidłowego działania chłodzenia naturalnego w projektowanych i istniejących budynkach. Projektowanie takich rozwiązań z integracją ręcznego i automatycznego otwierania okien jest szczególnie istotne dla budownictwa mieszkalnego [75]. W pracy Stasiego i in. [91] przeprowadzono analizę systemu automatycznego otwierania okien dla dwóch sal szkolnych. System opierał się na korelacji komfortu cieplnego oraz jakości powietrza w pomieszczeniach i bazował na algorytmie adaptacyjnym Humphreysa. Algorytm opiera się na szeroko akceptowalnej teorii komfortu adaptacyjnego i bazuje na zależności między temperaturą operatywną a temperaturą komfortu. Wykazano, że zaproponowany system zapewnia dobrą jakość powietrza (niski poziom stężenia CO₂) i komfort cieplny. Z kolei w pracy Psomasa i in. [92] autorzy opisali zaawansowany algorytm VC systemu okiennego oraz przygotowali narzędzia do symulacji wydajności budynku (ang. Building Performance Simulation (BPS)) w celu odzwierciedlenia działania algorytmu w świecie rzeczywistym. Symulacje przeprowadzono na sprzężonych środowiskach BPS narzędziami ESP-r i BCVTB (ang. Building Controls Virtual Test Bed Software) dla domu jednorodzinnego w Danii. W badaniach przeanalizowano wpływ różnych stopni otwierania okien dachowych na warunki cieplne oraz wykorzystano ich algorytm do zbadania systemów okiennych dla innych typów budynków i warunków klimatycznych. Sorgato i in. [86] przeanalizowali wpływ otwierania okien przez mieszkańców na zużycie energii budynku mieszkalnego. Rozważono szereg scenariuszy: otwieranie okien od rana do nocy, nocną wentylację i automatyczne sterowanie otwieraniem okien. Uwzględniono zróżnicowaną pojemność cieplną budynków i wykonano symulacje w programie EnergyPlus. Do zamodelowania wentylacji naturalnej skorzystano z modułu AirflowNetwork. Najlepsze warunki cieplne uzyskano dla budynku o średniej pojemności cieplnej i zautomatyzowanej kontroli wentylacji. Oceny skuteczności wentylacji realizowanej przez automatycznie otwierane okna w budynkach dokonano w pracach [67, 93]. W przypadku pracy Zhanga i in. [93] celem badań była ocena skuteczności krótkoterminowej wentylacji naturalnej jednostronnej w okresie zimowym pod kątem utrzymania odpowiedniego poziomu ditlenku węgla i zapewnienia komfortu w zmodernizowanym czteropiętrowym inteligentnym budynku w północno-wschodniej części Stanów Zjednoczonych. Sterowanie otwarciem okna było oparte na modelu predykcyjnym, który jest budowany na podstawie wcześniejszych danych przez proces ciągłego uczenia się tak, aby przewidzieć jak w najlepszym stopniu sterować otwieraniem okna w celu zapewnienia pożądanej temperatury i jakości powietrza wewnętrznego. Badania testowe w rzeczywistym budynku potwierdziły skuteczność tego typu sterowania.

W celu lepszej efektywności chłodzenia wentylacyjnego są stosowane rozwiązania wykorzystujące więcej niż jedną metodę pasywnego chłodzenia. W pracy Mushtaha i in. [69] wykazano, że równoczesne zastosowania elementów zacieniających (rolet zewnętrznych), wentylacji naturalnej i odpowiedniej izolacji termicznej przegród może zmniejszyć o 59% całkowite zużycie energii w budynkach mieszkalnych w klimacie umiarkowanym [69]. Skuteczność połączenia tych metod potwierdza również publikacja Bouwensa i in. [94]. Innym rozwiązaniem jest połączenie wentylacji naturalnej z kominem

słonecznym, szczególnie dla cieplejszych klimatów [95] lub z wykorzystaniem sufitów chłodzących [96]. Z kolei w pracy Zoure [97] wykonano optymalizację w zakresie wentylacji naturalnej i światła dziennego w budynkach biurowych w rejonie Afryki Subsaharyjskiej w celu poprawy efektywności energetycznej i warunków cieplnych. Ulepszenia obejmowały grupę przeciwsłonecznych metod pasywnego chłodzenia, m.in. zacielenia okien, orientacji budynku, stosunku okien do ścian.

Czasami chłodzenie pasywne może okazać się niewystarczające, szczególnie w cieplejszych klimatach, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest zbyt wysoka. W takich przypadkach powinno się łączyć naturalne wentylacyjne chłodzenie z mechanicznym [45]. Tuck i in. [98] przedstawili strategię stosowania pasywnego chłodzenia z wentylacją pełną, dzienną i nocną oraz bez tego systemu, w celu zmniejszenia zużycia energii. Przeprowadzili kampanię pomiarową w domu jednorodzinnym w Malezji. Dla porównania wykonano również pomiary systemu mieszanego, składającego się z wentylacji mechanicznej i klimatyzatora. Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy stwierdzili konieczność połączenia pasywnego chłodzenia z systemem mieszanym w klimacie ciepłym i wilgotnym. Z kolei Kitagawa i in. [99] przeanalizowali połączenie chłodzenia wentylacyjnego z systemem promiennikowego chłodzenia podłogowego w klimacie gorącym i wilgotnym. Głównym celem było określenie typu okna, który miał zapewnić jak najlepszy przepływ powietrza w pomieszczeniu pod kątem efektywności chłodzenia pasywnego i promiennikowego. Najlepszy efekt uzyskano przy zastosowaniu poziomego obrotowego okna. Natomiast w pracy Liu in. [71] udowodniono, że zastosowanie systemu hybrydowego pozwala zmniejszyć zużycie chłodu o około 22–23% w porównaniu z chłodzeniem mechanicznym. Drugą korzyścią wykorzystania naturalnego chłodu było uzyskanie wymiany powietrza w dopuszczalnym zakresie dla warunków komfortu mieszkańców do nawet 190% częściej niż przy klimatyzacji. W badaniach wykorzystano zarówno program EnergyPlus, jak i Ansys Fluent – były one wykonane dla wysokiego budynku mieszkalnego w Hongkongu, w którym zastosowano system okien nadprożowych. Gomis i in. [100] dokonali przeglądu badań z ostatnich 10 lat w zakresie systemów mieszanych, wykorzystujących zarówno naturalne, jak i mechaniczne chłodzenie. Przegląd obejmował analizę kluczowych czynników, które określają potencjał budynku w zakresie oszczędzenia energii, tj. założenia do symulacji, wybrany model komfortu, systemy HVAC. Szczegółowo skupiono się na metodach sterowania systemem hybrydowym. Wykazano, że klimaty ciepłe i umiarkowane są najbardziej odpowiednie dla wentylacji hybrydowej. Kolejnego przeglądu z zakresu badań nad strategiami wentylacji naturalnej i systemu mieszanego głównie w gorącym i wilgotnym klimacie dokonali Bienvenido-Huertas in. [45]. Przegląd obejmował badania z ostatnich 20 lat, skupiał się na analizie klastrowych badawczych, takich jak: efektywność energetyczna, komfort cieplny, jakość powietrza w pomieszczeniach i narzędzia symulacyjne. Na jego podstawie badacze stwierdzili, że systemy hybrydowe mogą być stosowane w obszarach o cieplejszym klimacie zamiast chłodzenia jedynie mechanicznego, co znajduje odzwierciedlenie we wnioskach z przeglądu literatury wykonanego przez Gomisa i in. [100]. Badacze wskazali również potrzebę prowadzenia badań nie tylko dla budownictwa mieszkalnego i biurowego, ale także dla budynków o podwyższonych

wymaganiach środowiska wewnętrznego, np. dla domów spokojnej starości. Według przeglądu, większość badań z tego zakresu dotyczy obszarów Chin, Indii, Australii, brakuje natomiast badań z innych rejonów świata. Autorzy przeglądu pokreślili również wagę odpowiedniego zamodelowania zachowania mieszkańców przy otwieraniu okien w celu uzyskania wiarygodnych wyników. Z kolei w pracy Sarny i in. [83] dokonano analizy zapotrzebowania na ciepło i chłód oraz komfortu cieplnego mieszkańców w budynku jednorodzinnym dla dwóch sposobów chłodzenia: mechanicznego przy użyciu klimatyzatorów i pasywnego, w którym powietrze zewnętrzne było dostarczane przez otwieranie okien dla obecnego rzeczywistego i standardowego klimatu w Polsce. Porównano również warunki cieplne dla budynku o izolacji przegród zgodnej ze standardami na 2017 rok i z wymaganiami dla budynków pasywnych. Badania wykazały, że w obecnym klimacie można stosować chłodzenie pasywne zamiast chłodzenia mechanicznego w budynkach mieszkalnych. Takie rozwiązanie obniża koszty zużycia energii przy jednoczesnym zapewnieniu komfortu. Przykład wykorzystania chłodzenia pasywnego odbywającego się w sposób wymuszony przedstawiono w pracy Grygierka i Ferdyn-Grygierek [101]. Autorzy zastosowali chłodzenie pasywne oparte na mechanicznym nawiewie nieuzdatnionego powietrza zewnętrznego. Do regulowania ilości strumienia powietrza nawiewanego użyto sterownik rozmyty oraz wykonano jego optymalizację, bazując na metodzie algorytmów genetycznych. Obliczenia były przeprowadzone w programie EnergyPlus dla klimatu umiarkowanego przejściowego występującego w Polsce. Wykazano, że stosowanie optymalnie sterowanej wentylacji mechanicznej pozwala na poprawę warunków cieplnych, przy liczbie godzin dyskomfortu na poziomie zaledwie 2% w ciągu roku. Natomiast w pracy Grygierka i Sarny [84] porównano dwie metody pasywnego chłodzenia w typowym polskim domu jednorodzinnym: pierwsza z wykorzystaniem powietrza zewnętrznego dostarczanego do budynku za pomocą wentylatorów, druga przez otwieranie okien (automatycznie lub przez mieszkańców). W obu przypadkach zaproponowano i zoptymalizowano rozmyte sterowniki czasu chłodzenia i kontrolowania przepływem powietrza nawiewanego. Badania wykazały, że chłodzenie powietrzem zewnętrznym może znacząco poprawić warunki cieplne przy nieznacznym zwiększeniu zapotrzebowania ciepła na ogrzewanie. Kolejną pracą analizującą skuteczność chłodzenia w systemie hybrydowym jest praca Alonso i in. [102]. Połączono w niej wentylację mechaniczną realizowaną przez wentylatory oraz naturalną sterowaną przez automatycznie otwierane okno, również w systemie nocnym. Wyniki wskazują na istotne oszczędności energii przy zastosowaniu chłodzenia wentylacyjnego. Z kolei Brambilla i in. [103] przeanalizował godziny przegrzania występujące przy zastosowaniu innego podejścia wentylacyjnego (free-cooling) uwzględniającego wpływ masy termicznej budynku biurowego zlokalizowanego we Fryburgu. Wśród różnych symulowanych scenariuszy uwzględniających różne poziomy masy cieplnej, strategię wentylacji i typologię konstrukcji nadużycie (niewłaściwe wykorzystanie) wentylacji naturalnej wykazało większy wpływ na odczuwany komfort cieplny ludzi, zwłaszcza w połączeniu z niską pojemnością cieplną budynku.

Skuteczność technik pasywnych zależy bezpośrednio od lokalnych warunków klimatycznych, zmieniających się nie tylko w ciągu roku, ale również w ciągu dnia. Dlatego nie każda alternatywna metoda może być odpowiednim rozwiązaniem dla danej lokalizacji, ale zawsze należy brać pod uwagę lokalne warunki klimatyczne [75, 104]. Artmann i in. [105] oceniali skuteczność pasywnego chłodzenia budynków powietrzem wentylacyjnym we wszystkich strefach klimatycznych Europy. Wykazali wysoki potencjał nocnego chłodzenia wentylacyjnego w północnej Europie i nadal znaczny potencjał w pozostałych regionach Europy. Jednak ze względu na nieodłączne właściwości stochastyczne wzorców pogodowych, w niektórych miejscach może wystąpić seria cieplejszych nocy, w których chłodzenie pasywne przez samą wentylację nocną może nie być wystarczające do zapewnienia komfortu cieplnego. Z kolei w pracy Michaela [88] porównano działanie wentylacji dziennej, całodobowej i nocnej oraz w przypadku wentylacji nocnej zbadano różne systemy otwierania okien: wentylację poprzeczną, jednostronną. Badania były prowadzone dla okresu upalnego lata na Cyprze dla budynku o architekturze wernakularnej. Wyniki pokazały wyższy potencjał nocnego chłodzenia wentylacyjnego, szczególnie wentylacji poprzecznej, nad pozostałymi rozwiązaniami. Również wyniki badań Kuboty i Chyee [106] potwierdziły lepszą efektywność wentylacji nocnej, ale wymuszonej za pomocą wentylatorów i dla klimatu tropikalnego.

3.2 Dane klimatyczne a ocena wydajności energetycznej budynku

Ważną kwestią z punktu widzenia oceny wpływu rozwiązań ogrzewania i chłodzenia na zużycie energii jest wybór danych klimatycznych uwzględnianych w obliczeniach. Jest to szczególnie ważne w dobie zmian klimatycznych. Obecnie dostępna jest szeroka gama plików danych pogodowych – od lokalnie zarejestrowanych przez stacje meteorologiczne po typowe lata meteorologiczne dostępne w zbiorach danych jako TMY (Typowy Rok Meteorologiczny), TRY (Test Referencyjny Rok) i IWEC (International Weather for Energy Calculation). Szczegółowy opis każdego z tych zbiorów znajduje się w pracy Herrera'ego i in. [107].

Naukowcy pokazują, że aktualne pliki danych pogodowych, tj. TMY, wykorzystywane do symulacji przyszłych zachowań termicznych budynków nie są wiarygodne [108]. Warunki klimatyczne XX wieku (powszechnie stosowane w typowym roku meteorologicznym) mogą nie odzwierciedlać pełnego zakresu ekstremalnych warunków, które mają wpływ na środowisko wewnętrzne budynku [109]. Cui i in. [110] wskazali, że różnica między danymi TMY a aktualnymi danymi pogodowymi dla danego roku może prowadzić do różnic w symulacji wydajności budynku, dlatego zmiana klimatu jest ważnym czynnikiem w procesie symulacji energetycznej. Do budowania plików danych przyszłych klimatów służą specjalistyczne oprogramowania, tj. CCWorldWeatherGen, WeatherShift, Advanced Weather GENerator i Meteonorm. Porównanie tych programów zostało opisane w badaniu Yassaghi i in. [111] oraz Moazami i in. [112]. Programy wykorzystują specjalne metody przewidywania przyszłego klimatu; najpopularniejszą jest tzw. metoda morfingu, która opiera się na morfingu obserwacji historycznych. Procedura ich tworzenia bazuje na wytycznych podanych w dokumencie SRES (Special Report on Emissions Scenarios) [113], opublikowanym przez IPCC (Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu) [6].

W niniejszym dokumencie przedstawiono serię scenariuszy emisji gazów cieplarnianych A1FI, A1B, A1T, A2, B1 i B2 z różnymi zmiennymi społecznymi i ekonomicznymi. Najbardziej niekorzystnym scenariuszem jest A2, który dzieli (regionalizuje) świat, skupia się na zorientowanym regionalnie i zróżnicowanym rozwoju gospodarczym. Ponadto przewidywane stężenie CO₂ na 2100 rok jest najwyższe w porównaniu do innych scenariuszy [114, 115]. IPCC regularnie aktualizuje prognozy globalnego ocieplenia, ostatni raport IPCC AR6 został opublikowany w 2022 [8].

Wiele badań ujawniło wpływ zmian klimatycznych na zapotrzebowanie na ogrzewanie i chłodzenie. Na przykład Invidiata i Ghisi [108] zbadali ten problem w mieszkaniach w trzech miastach w Brazylii. Korzystając z programu symulacyjnego EnergyPlus, oszacowali temperaturę w pomieszczeniu oraz przyszłe roczne zapotrzebowanie na energię wykorzystywaną do ogrzewania i chłodzenia. Wdrożono także strategię pasywnego chłodzenia. Wyniki wykazały wzrost rocznego zapotrzebowania na energię od 56% do 112% w przypadku trzech miast w 2050 r., ale zastosowanie strategii pasywnych zmniejszyło przyszłe roczne zapotrzebowanie na chłodzenie i ogrzewanie nawet o 50%. Kikumoto i in. [116] zauważyli różnice w zużyciu energii w okresie życia budynków w Japonii. Symulacje wykazały, że obecne obciążenie cieplne domu wzrasta o 15% w 2034 roku. Z kolei w badaniu Vericheva i in. [114] przeanalizowano wpływ zmian klimatycznych na zużycie energii w trzech regionach południowego Chile. Stwierdzono, że zużycie energii grzewczej w domu jednorodzinnym spadło średnio o 13% do 27% w zależności od scenariusza zmian klimatycznych.

Europa Północna i Środkowa to jeden z regionów skazanych na dramatyczne zmiany w wyniku globalnego ocieplenia. Podczas gdy ocieplenie klimatu zmniejsza liczbę dni, w których ogrzewanie jest konieczne, zwiększone zapotrzebowanie na chłodzenie może prowadzić do wyższego całkowitego zużycia energii. Ma to ogromne znaczenie podczas fal upałów i dni szczytowego zapotrzebowania na chłodzenie [117]. Dodoo i in. [118] badali wpływ globalnego ocieplenia na charakterystykę energetyczną konwencjonalnych i pasywnych budynków wielorodzinnych w Szwecji. Zużycie energii na ogrzewanie w budynku konwencjonalnym spadło o 13% w 2050 r. i 16% w 2100 r., podczas gdy zużycie energii na chłodzenie wzrosło odpowiednio o 33% i 42%. Z drugiej strony zużycie energii na ogrzewanie domu pasywnego spadło z 22% do 17% w 2050 roku i 2100 roku, a na chłodzenie wzrosło odpowiednio z 39% do 49%. Wyniki pokazały, że budynki pasywne są projektowane głównie w celu zmniejszenia zużycia ciepła. Wnioski zostały potwierdzone w kolejnych badaniach tego zespołu badawczego [119]. Natomiast w Danii Hamdy i in. [120] dokonali oceny ryzyka przegrzewania różnych typów budynków w ocieplonym klimacie oraz potencjału chłodzenia wentylacyjnego jako sposobu ograniczenia przegrzewania budynków. Stwierdzono, że dobrze zaizolowane domy jednorodzinne o dużych nieosłoniętych powierzchniach przeszklonych oraz z niską przepuszczalnością ciepła i powietrza, a także mieszkania znajdujące się na wyższych kondygnacjach w budynkach zamieszkania zbiorowego będą w przyszłości szczególnie narażone na przegrzewanie. Ocenienie potencjału systemów wentylacyjnego chłodzenia powietrzem zewnętrznym do ograniczenia zjawiska przegrzewania budynków w 2050 roku w Polsce było przedmiotem badań w pracy Ferdyn-Grygierek i in. [85]. Analizy

zapotrzebowania energii na ogrzewanie i chłodzenie oraz komfortu cieplnego mieszkańców zostały przeprowadzone dla budynku jednorodzinny o konstrukcji zgodnej z Warunkami Technicznymi [15] oraz stosowanej w budynkach pasywnych. Badania pokazały wysoką efektywność wentylacyjnego chłodzenia w obecnym klimacie. Natomiast w przyszłości takie rozwiązanie może być niewystarczające. W skrajnym przypadku dla pokoju o największym nasłonecznieniu w okresie letnim aż 20% czasu przebywania tam ludzi nie będzie zapewniony komfort cieplny. Również badania Bienvenido-Huertas i in. [121, 122] wykazały, że w 2100 roku obszar Europy, w którym będzie można stosować efektywnie wentylację naturalną do chłodzenia budynków, zostanie przesunięty z terenów południowych na północną część Europy.

3.3 Ocena rozkładu parametrów w pomieszczeniu z wentylacją naturalną

Kolejnym ważnym aspektem w ocenie skuteczności pasywnego wentylacyjnego chłodzenia budynków, poza uzyskaniem oszczędności energii i wymaganych zakresów temperatury w pomieszczeniach, jest sprawdzenie warunków cieplnych lokalnie w różnych częściach pomieszczenia. Odpowiednio przeprowadzana analiza rozkładów parametrów powietrza wewnętrznego pokazuje, czy zastosowana metoda pasywnego chłodzenia nie powoduje negatywnego oddziaływania na użytkowników pomieszczenia, np. zjawiska przeciągu, lokalnych obszarów cieplejszego powietrza czy miejsc z bardzo niskim przepływem powietrza. Do modelowania warunków cieplnych w pomieszczeniu z wentylacją naturalną służy technika CFD. W porównaniu z programami do symulacji cieplnej budynku, tj. EnergyPlus, programy CFD umożliwiają w dokładniejszy sposób przewidywać przepływ powietrza w pomieszczeniach [123].

Samo modelowanie numeryczne wentylacji naturalnej przy użyciu techniki CFD jest przedmiotem wielu badań naukowych [124]. Badania te można podzielić na kilka grup w zależności od obiektu badań. Znaczna część z nich skupia się na analizie skuteczności wentylacji naturalnej w całym budynku [67, 125-131] czy w mieszkaniu [132], dużej przestrzeni biurowej [133], a nawet dla osiedla mieszkań [134]. Przy tak wielkich domenach obliczeniowych modele obiektów badań są wykonywane w sposób uproszczony, nie skupiają się bezpośrednio na ocenie warunków cieplnych w ujęciu lokalnym a bardziej globalnym. Przykładowo w pracy Zhou i in. [125] pokazano optymalizację wydajności wentylacji naturalnej w wysokich budynkach mieszkalnych w Chongqing w Chinach polegającą na odpowiednim zaprojektowaniu lokalizacji i wielkości okien w sypialniach, tak aby wykorzystać w jak najlepszy sposób przepływ powietrza przez pomieszczenia. W pracy Sakiyama [126] zamodelowano wymianę powietrza w referencyjnym budynku jednorodzinny, a w pracy Gimeneza [128] w budynku o nieprostokątnym rzucie. Każda z wymienionych prac potwierdziła wysoką skuteczność wentylacji naturalnej; np. w pracy Gimeneza [128] wykazano, że stosowanie wentylacji naturalnej pozwala na zmniejszenie nawet o ponad 65% stopniogodzin chłodzenia. Kolejną pracą dotyczącą potencjału wentylacji naturalnej w wysokich budynkach biurowych jest publikacja Raji [67]. Obliczenia CFD zostały wykonane w module programu DesignBuilder, którego silnikiem obliczeniowym jest program

EnergyPlus. Do oceny komfortu wykorzystano rozkłady temperatury i przepływu powietrza dla wybranej kondygnacji budynku. Jako kryterium spełnienia warunków komfortu wybrano uzyskanie minimalnej wymiany powietrza w pomieszczeniach ($0,85 \text{ h}^{-1}$) i temperatury powietrza (22°C). W pracy Figueroa-Lopeza [129] obliczenia również przeprowadzono w programie DesignBuilder. W tym przypadku zbadano zdolność stosowania zacienienia oraz wentylacji naturalnej do redukcji przegrzewania się pomieszczeń w gorącym klimacie wysokiego budynku mieszkalnego w Bilbao należącego do budownictwa pasywnego. Jednak w celu zapewnienia odpowiedniej ilości powietrza higienicznego w budynku była stale uruchomiona wentylacja mechaniczna. Najlepsze wyniki uzyskano przy połączeniu chłodzenia wentylacyjnego i ruchomego zacienienia zewnętrznego, przy czym autorzy wskazali na niezlikwidowanie całkowicie ryzyka przegrzewania (do 10% godzin w ciągu roku) oraz wysokie wartości przepływów powietrza w pomieszczeniach (do 90 h^{-1}). Z kolei w pracy Iskandara [130] przeprowadzono symulacje efektywności wentylacji naturalnej dla zabytkowego budynku mieszkalnego zlokalizowano w Teksasie, czyli w obszarze o gorącym i wilgotnym klimacie. W tym przypadku użyto innego oprogramowania – IES VE. Badania skupiały się na porównaniu 6 strategii od wentylacji naturalnej do chłodzenia budynku: wentylację nocną, poprzeczną, kominową, z otwartymi oknami w pełnym stopniu i 50% otwarcia oraz teoretyczny brak wentylacji. Najbardziej energooszczędnym systemem okazała się wentylacja poprzeczna. Wśród najnowszych badań skupiających się na ocenie potencjału chłodzenia wentylacji poprzecznej można wymienić prace Stasiego i in. [70, 131]; w pierwszej z nich [70] połączono symulację CFD z modelowaniem energii budynku w celu oceny wpływu wentylacji poprzecznej oraz formy budynku na poprawę warunków cieplnych dla prototypu socjalnego budynku mieszkalnego znajdującego się w obszarze o gorącym i suchym klimacie. Wyniki pokazały, że nawet w trudnych warunkach klimatycznych zastosowanie wentylacji naturalnej może ograniczyć zużycie energii przy jednoczesnej poprawie warunków środowiska cieplnego. Drugie badania Stasi i in. [131] wykonali dla postmodernistycznego budynku o wysokości 83 m w Indiach, w których również potwierdzili możliwości wykorzystania wentylacyjnego chłodzenia budynku. W obydwu pracach wykorzystano 3 programy: Ansys Fluent, Matlab oraz DesignBuilder.

Druga grupa badań dotyczy modeli pojedynczych pomieszczeń z wentylacją naturalną, które umożliwiają dokładniejszą ocenę lokalnego komfortu. Przykładowe badania to [135-142]. W pracy Raczkowskiego i in. [142] dokonano oceny komfortu cieplnego przy użyciu wskaźników PMV i PPD w pomieszczeniu z wentylacją naturalną. Jednak powietrze do pomieszczenia nie było dostarczane przez szczeliny okienne, a specjalny zawór powietrzny znajdujący się na ścianie zewnętrznej pomieszczenia. Część badań [132, 135, 136, 137, 140, 141, 143] koncentruje się na optymalizacji lokalizacji, wymiarów, typów otworów nawiewnych, w tym okien. W pracy Elshafeia [132] wykazano, że optymalizacja parametrów okna (rozmiaru, orientacji, zacienienia) pozwala uzyskać niższą temperaturę powietrza wewnętrznego o 2,5% i 6-krotnie wyższe wartości prędkości powietrza, co przyczyniło się do poprawy warunków cieplnych. Wg badań Widiastuti i in. [135] wykonanych w komorze klimatycznej lepszą wydajność wentylacji naturalnej można uzyskać, stosując okna żaluzjowe, a nie uchylne. Jednak nie jest to typ okien często

stosowany w budownictwie mieszkalnym. Natomiast w pracy Ma i in. [144] porównano 3 konfiguracje otworów wentylacyjnych: wentylację jednostronną z otworem w ścianie nawietrznej, wentylację jednostronną z otworem w ścianie zawietrznej oraz wentylację poprzeczną z dwoma otworami na obydwu ścianach. Najlepsze wyniki uzyskano dla wentylacji poprzecznej. Porównanie skuteczności wentylacji naturalnej jednostronnej dla 6 typów okien powszechnie stosowanych w budownictwie mieszkalnym (pionowo-przesuwne, uchylne, markizy, poziome i pionowe obrotowe oraz otwierane) zostało przedstawione w pracy Wanga i in. [140]. We wnioskach końcowych autorzy podali zalecenia dotyczące realizacji określonych konfiguracji okien, tak aby w jak najefektywniejszy sposób wykorzystać warunki atmosferyczne. W pracy Chou i in. [145] sprawdzono wpływ zastosowania wewnętrznego okna obrotowego poziomego w sypialni na wydajność wentylacji, najlepsze efekty uzyskano dla uchylenia okna od 90° do 180°. Poza oceną wydajności wentylacji naturalnej po optymalizacji parametrów okna weryfikuje się również, w jaki sposób jest kształtowana struga powietrza wypływająca z szczeliny/otworu okiennego. Przykładowo w pracy Wanga [146] analizowano przepływ powietrza w komorze badawczej z wentylacją jednostronną dla 3 typów okien: uchylonych, markizowych i skrzydłowych. Modelowanie CFD wykorzystano do stworzenia wzoru empirycznego opisującego zależność między rodzajem okna, a współczynnikiem wymiany powietrza w pomieszczeniu. Otrzymane wyniki różniły się o ok. 30% od wartości uzyskanych w czasie pomiarów z zastosowaniem gazów znacznikowych. Natomiast w pracy Chunga i in. [147] zbadano wpływ różnej liczby i miejsc montażu markiz okiennych na przepływ powietrza i rozkład zanieczyszczeń powietrza w toaletach publicznych.

3.4 Wpływ systemów HVAC na środowisko zewnętrzne

Poza oceną efektywności energetycznej systemów ogrzewania, wentylacji i chłodzenia budynków istotnym elementem jest podjęcie analizy środowiskowej, umożliwiającej ocenę stosowanych systemów pod kątem ich wpływu na środowisko zewnętrzne. W idealnym przypadku, mając do dyspozycji wszystkie potrzebne dane, należałoby przeprowadzić ocenę cyklu życia LCA zdefiniowaną zgodnie z normą ISO 14040 [148] jako „technikę oceny aspektów środowiskowych i potencjalnych wpływów na środowisko w całym okresie życia wyrobu, czyli od kołyski do grobu”. W metodyce LCA budynki są traktowane jako wyrób, czyli analiza powinna być przeprowadzona dla całego budynku. Należy wziąć pod uwagę wszystkie wyroby i procesy występujące podczas całego cyklu życia budynku [12]. Jednak, ze względu na dużą złożoność i czasochłonność przygotowywania wszystkich danych oraz braki niezbędnych informacji do przeprowadzenia rzetelnej analizy cyklu życia, często badania są realizowane jedynie dla materiałów budowlanych bądź części budynku. W tym przypadku analiza obejmuje porównanie poszczególnych materiałów, np. izolacyjnych, konstrukcyjnych, systemów HVAC, a także nośników energii na ich wytworzenie, takich jak gaz czy energia elektryczna pod kątem oddziaływania na środowisko. Do części budynku można zaliczyć kombinacje komponentów wykonanych w określonej technologii, np. na przegrody zewnętrzne, okna

czy systemy grzewcze [148]. Jako kryterium oceny przyjmuje się wskaźniki oddziaływania na środowisko, wśród najczęściej stosowanych jest ślad węglowy.

Ślad węglowy (ang. carbon footprint), zaliczany do elementów śladu ekologicznego, służy do określenia całkowitej emisji gazów cieplarnianych (w tym ditlenku węgla), bezpośrednio i pośrednio spowodowanej działaniem lub skumulowanej na etapach pełnego cyklu życia produktu (przedsiębiorstwa). Wielkość śladu węglowego określa ilość ekwiwalentu ditlenku węgla (wyrażonego najczęściej jako CO₂e na jednostkę funkcjonalną produktu) wyemitowanego w trakcie produkcji, dystrybucji, użytkowania i utylizacji produktu [149]. Jego jednostką miary jest wskaźnik GWP (ang. Global Warming Potential), czyli potencjał tworzenia efektu cieplarnianego, który definiuje się jako ilość energii, jaką pochłonie emisja 1 tony gazu w danym okresie, zwykle 20-, 100-, 500-letnim w porównaniu z emisją jednej tony CO₂. Oznacza to, że dla CO₂ wskaźnik GWP wynosi 1. Jest wykorzystywany do ilościowej oceny wpływu danego gazu na efekt cieplarniany. Wartości GWP dla poszczególnych gazów wahają się od 1 do kilkunastu tysięcy w przypadku okresu 100 lat, co wynika z różnej zdolności do pochłaniania energii, wydajności radiacyjnej [150]. W literaturze można wyróżnić wiele innych wskaźników oddziaływania na środowisko, np. zawartość wcielonego węgla (ang. Embodied carbon), zakwaszenie AP (ang. Acidification Potential), potencjał eutrofizacji EP (ang. Eutrophication Potential), zmniejszania zasobów ozonu stratosferycznego ODP (ang. Ozone Depletion Potential), potencjał toksyczności dla gleb (ang. Terrestrial EcoToxicity Potential), potencjał odczuwalności zapachów OTV (Odour Threshold Value) i całkowite zużycie energii pierwotnej [151]. W niniejszej pracy skupiono się na analizie środowiskowej obejmującej emisję ditlenku węgla.

Środowiskowa ocena cyklu życia domów jednorodzinnych jest przedmiotem wielu badań naukowych. Wśród nich występuje podgrupa zajmująca się oceną wpływu na środowisko przy różnych systemach HVAC i przy różnych źródłach energii. Poniżej opisano przykładowe prace związane z tą tematyką.

W artykule Moschetti i Brattebø [152] przeprowadzono studium przypadku oceny cyklu życia i kalkulacji kosztów cyklu życia w połączeniu z oceną wydajności energetycznej dla budynku jednorodzinnego w Norwegii. Celem badań była ocena 7 alternatywnych scenariuszy modernizacji budynku, które uwzględniały m.in. wprowadzenie systemu wentylacji z odzyskiem ciepła, wymianę instalacji centralnego ogrzewania i źródła ciepła. Scenariusze różniły się od siebie zastosowanymi urządzeniami systemu centralnego ogrzewania (grzejniki wodne, elektryczne, pompa ciepła, kocioł na drewno), a w niektórych przypadkach wykorzystano również technologie energii odnawialnej (panele fotowoltaiczne, system solarny). Jako wskaźnik oddziaływania na środowisko wybrano potencjał tworzenia efektu cieplarnianego GWP. Badania systemów ogrzewania pokazały, że różnice w wartościach pomiędzy najlepszym a najgorszym rozważanym scenariuszem były niższe o 50% dla zapotrzebowania na ciepło i 32% dla globalnego ocieplenia. Najniższą wartość wskaźnika GWP otrzymano dla rozwiązania, zgodnie z którym zastosowano pompę ciepła typu powietrze-woda z grzejnikami wodnymi, systemem paneli fotowoltaicznych oraz systemem solarnym, a najwyższą dla systemu

z elektrycznym ogrzewaniem podłogowym i grzejnikami elektrycznymi. Z kolei w artykule Almeida i in. [153] przeanalizowano kilka możliwych wariantów modernizacji budynku jednorodzinnego (w tym systemu ogrzewania) w Portugalii. Zastosowano meteorologię podaną w Annexie 56 programu IEA EBC (ang. International Energy Agency Energy in Buildings and Communities Programme) [154]. Głównym celem badań było porównanie kilku scenariuszy modernizacji pod względem nie tylko redukcji zużycia energii i emisji CO₂, ale także wykorzystania odnawialnej energii. Analiza została przeprowadzona pod kątem ekologicznym, przy jednoczesnym zachowaniu opłacalności inwestycji. Najlepszą wydajność energetyczną i skuteczną redukcję emisji CO₂ uzyskano przy zastosowaniu pompy ciepła i paneli fotowoltaicznych. Stwierdzono również, że lepsze efekty zostaną uzyskane „po przejściu” na energię odnawialną niż przy dużej modyfikacji przegrody zewnętrznej, której koszty modernizacji są wysokie. Kolejnym badaniem potwierdzającym przewagę odnawialnych źródeł energii nad kopalnianymi pod względem emisji CO₂ jest praca Kim i in [155]. Celem badania było oszacowanie potencjału redukcji emisji CO₂ oraz użycia energii pierwotnej i wtórnej przez zastosowanie kotłów na biomasę drzewną (z pelet) w porównaniu z elektrycznymi pompami ciepła klimatyzatorów, miejskimi kotłami gazowymi zasilanymi LNG, kotłami gazowymi zasilanymi LPG i piecami na naftę wykorzystywanymi w mieście Nagano (klimat zimny w Japonii). Na podstawie wyników stwierdzono oszczędność emisji odpowiednio do 85%, 75%, 75% i 76%.

Wśród prac polskich autorów można wyróżnić monografię Lewandowskiej i in. [148], w której przeprowadzono ocenę cyklu życia dla dwóch modelowych budynków jednorodzinnych wykonanych w technologii murowanej i drewnianej zlokalizowanych w Polsce, w tym każdy budynek był analizowany jako konwencjonalny i pasywny obiekt. Głównym celem badań było „określenie konsekwencji środowiskowych występujących w całym cyklu życia (100 lat) rozważanych budynków, zidentyfikowanie głównych źródeł tego oddziaływania oraz wykazanie powiązań pomiędzy owym oddziaływaniem, a strukturą materiałową, konstrukcją i zapotrzebowaniem energetycznym budynków”. Badania obejmowały analizę aż 2200 procesów jednostkowych. Na podstawie przeprowadzonej oceny stwierdzono, że najwięcej negatywnych oddziaływań na środowisko, bo ponad 90% skumulowanego wskaźnika, powstaje na etapie użytkowania wszystkich budynków. Zauważono także, że w budynkach pasywnych, pomimo 3,6 razy niższego zapotrzebowania energetycznego, wystąpiło wyższe oddziaływanie na środowisko niż w budynkach tradycyjnych. Wynika to z faktu, że wszystkie potrzeby energetyczne były pokrywane przy użyciu energii elektrycznej. W budynkach konwencjonalnych był to gaz, którego wyprodukowanie w zdecydowanie mniejszym stopniu (ponad 5 razy mniej) wpływa negatywnie na środowisko.

W artykule Grygierka i in. [87] przeprowadzono analizę porównawczą śladu węglowego (potencjału tworzenia efektu cieplarnianego GWP) dla budynku jednorodzinnego o powierzchni 150 m² również zlokalizowanego w Polsce, w jednopokoleniowym cyklu życia (25 lat). Analiza była prowadzona dla dwóch typów konstrukcji: budynek wykonany z cegły i budynek w konstrukcji szkieletowej drewnianej oraz różnych typów źródeł ciepła – wzięto pod uwagę zarówno rozwiązania tradycyjne, jak i energooszczędne. Badania

wykazały, że z punktu widzenia wskaźnika globalnego ocieplenia najlepszym rozwiązaniem źródła ciepła jest wybór pompy ciepła lub kotła na biomasę; w porównaniu z kotłem elektrycznym w takim przypadku emisja gazów cieplarnianych może być nawet 4 razy niższa. Natomiast w kolejnej pracy Grygierek i Ferdyn-Grygierek [156] przeprowadzili wielowariantową analizę pięciu kategorii wskaźników oddziaływania na środowisko: GWP, zakwaszenie, eutrofizacja, zubożenie warstwy ozonowej oraz całkowite zużycie energii pierwotnej dla domu jednorodzinnego zlokalizowanego w Polsce w 25-letnim cyklu życia. Badania przeprowadzono dla dwóch różnych rodzajów konstrukcji budowlanych (murowanej i drewnianej), dwóch wariantów ocieplenia przegród zewnętrznych oraz czterech źródeł ciepła (kocioł: gazowy, węglowy, elektryczny i na biomasę). Wyniki badań pokazały, że w przypadku korzystania z elektrycznego źródła ciepła etap użytkowania ma największy wpływ na środowisko, odpowiadając za maksymalnie 80% całkowitej emisji w całym cyklu życia. Współczynnik ten można zmniejszyć o połowę w przypadku domu z grubszą izolacją ścian zewnętrznych i kotłem na ekobiomasę.

W powyższym przeglądzie literatury omówiono wyłącznie wybrane artykuły, jednak ich analiza pokazała, że wybór systemu ogrzewania wpływa znacząco na emisję dwutlenku węgla do atmosfery. Uzyskany wynik zależy silnie od warunków klimatu zewnętrznego (wielkość energii na ogrzewanie/chłodzenie), dlatego wyniki w takich badaniach mają często charakter bardzo lokalny i w żaden sposób nie można ich uogólniać. Lepsze wyniki pod względem uzyskanego wskaźnika GWP dają budynki z dobrą izolacją przegród zewnętrznych (np. pasywne) bez klimatyzacji, jednak problemem pozostaje komfort cieplny użytkowników, a raczej jego brak w okresie letnim.

Na koniec należy wspomnieć, że pomimo dużego zainteresowania tematyką środowiskowej oceny cyklu życia domów jednorodzinnych, najwięcej badań z tego zakresu wykonuje się w instytutach badawczych i na uczelniach. Głównym ograniczeniem jest złożoność techniki i jej czasochłonność. Dodatkowym ograniczeniem jest wciąż uboga baza polskich materiałów posiadających deklarację środowiskową produktu (EPD) zgodną z PN EN 15804+A2:2020 03 [24]. Praktycznie wszystkie programy komputerowe (zawierające bazy materiałów polskich i europejskich) wspomagające analizy należą do grupy programów komercyjnych płatnych.

3.5 Podsumowanie i luka badawcza

Energetyczna i środowiskowa ocena ogrzewania, chłodzenia i wentylacji budynków jest coraz bardziej istotnym obszarem badań w związku z rosnącymi wymaganiami w zakresie zrównoważonego budownictwa i zmian klimatycznych. Badania w zakresie pasywnego chłodzenia budynków mieszkalnych mają potencjał przynieść korzyści środowiskowe, ekonomiczne i społeczne. Są one szczególnie istotne w kontekście dążenia do neutralności klimatycznej oraz tworzenia bardziej odpornych na zmiany klimatyczne przestrzeni mieszkalnych.

Analiza stanu wiedzy wskazała na ogromne zainteresowanie poruszaną w pracy tematyką, jednak są pewne obszary wymagające dalszych badań:

1. Zintegrowana kompleksowa ocena

Brakuje kompleksowych ocen pasywnego chłodzenia powietrzem zewnętrznym budynków mieszkalnych jednorodzinnych realizowanego przez otwieranie okien przez mieszkańców bądź automatycznie, które uwzględniają nie tylko zużycie energii w budynku, ale także chwilową zmienność wymiany powietrza i jej wpływ na globalny i lokalny komfort cieplny mieszkańców oraz operacyjne emisje gazów cieplarnianych. Taka ocena wymaga przeprowadzenia zintegrowanych symulacji obejmujących z jednej strony obliczenia numeryczne BPS, w których systemy ogrzewania, wentylacji i chłodzenia są modelowane w sposób jak najbardziej odzwierciedlający ich rzeczywiste działanie, a z drugiej prognozowanie numeryczne CFD przepływu powietrza w pomieszczeniu, umożliwiając w ten sposób szerszą ocenę efektywności pasywnego chłodzenia, również pod kątem rozkładu parametrów powietrza w przestrzeni pomieszczenia.

2. Wpływ zmian klimatycznych na efektywność systemów HVAC

Większość obecnych badań budynków polskich opiera się na statycznych modelach klimatycznych. Brakuje analiz, które uwzględniają zmieniające się wzorce pogodowe i ich wpływ na efektywność ogrzewania, wentylacji i chłodzenia dla typowego budynku jednorodzinnego zlokalizowanego w Polsce i umożliwiłaby przełożenie wyników analizowanego przypadku do ogólnych wytycznych projektowych. Analiza skuteczności proponowanych technik chłodzenia w różnych klimatach i ich wpływ na bilans energetyczny budynków jest obszarem o dużym znaczeniu praktycznym i naukowym.

3. Interakcje między technologiami HVAC a zachowaniami użytkowników

Istnieje ograniczona wiedza na temat tego, jak rzeczywiste zachowania mieszkańców wpływają na efektywność energetyczną systemów HVAC, w tym metod pasywnych oraz jak można zoptymalizować systemy, aby dostosowywały się do zmiennych nawyków użytkowników. Obliczenia uwzględniające nieprawidłowe zachowanie użytkownika w zakresie sterowania systemem HVAC są kluczowe dla tworzenia modelowych wytycznych automatycznej regulacji.

4. Koszty i akceptacja użytkownika

Niewystarczająca jest liczba badań oceniających efektywność kosztową różnych metod chłodzenia oraz umożliwiających zrozumienie czynników wpływających na akceptację

społeczną tych technologii. Wdrożenie chłodzenia często wymaga inwestycji, co może być barierą dla wielu właścicieli budynków. Opracowanie kosztowo efektywnych metod chłodzenia pasywnego, które będą dostępne dla szerokiego grona użytkowników, w tym dla społeczności o niskich dochodach, jest kluczowe w obszarze tworzenia wytycznych pozwalających dostosować budynki do zmieniających się potrzeb użytkowników w zmieniających się warunkach klimatycznych.

Należy jeszcze zwrócić uwagę na kilka aspektów dokładności modelowania zjawisk przepływu masy i energii w budynku. W dotychczasowych badaniach jednoczesną analizę energetyczną (zużycia energii) i środowiskową (komfortu cieplnego i emisji CO₂) wykonywano przeważnie na podstawie tylko symulacji BPS przeprowadzanych np. w programie EnergyPlus. W badaniach modele systemów HVAC (szczególnie wentylacji) były wykonywane z różnym stopniem dokładności, a ich opis w pracy był najczęściej skrótowy/lakoniczny. W przypadku modelowania wentylacji naturalnej korzystano z wielu uproszczeń, przykładowo w pracy [117] nie uwzględniano jej zmienności w kroku czasowym, szczególnie dla klimatyzowanych budynków zakładano stałą wymianę powietrza infiltracyjnego; nie uwzględniano międzystrefowego przepływu powietrza, np. w pracach [67, 87], czy przepływu powietrza przez kominy grawitacyjne, np. w pracy [86], co w analizie długoterminowej mogło znacząco wpłynąć na ostateczne wyniki. Sakiyama i in. [68] w swoim przeglądzie badań podsumowali, że najczęściej stosowanym modelem (w 70% prac) do wentylacji naturalnej był model AFN (ang. Airflow Network), nie uwzględniający wentylacji grawitacyjno-kominowej. W niektórych publikacjach [70, 131, 157] problem rozwiązywano przez prowadzenie zintegrowanej symulacji z programami CFD, w których modelowano wentylację naturalną, uzyskując brakujące dane (liczbę wymian powietrza, rozkłady parametrów powietrza: temperatury, prędkości, ciśnienia, wilgotności względnej, stężenia zanieczyszczeń, wielkości turbulencji) do symulacji BPS. Innym rozwiązaniem tego problemu jest wykonanie kosymulacji np. z programem CONTAM dedykowanym do symulowania zmiennej wymiany powietrza w budynku przeprowadzonej w dynamicznych warunkach zewnętrznych i wewnętrznych z małym krokiem czasowym dla całego okresu chłodzenia. Takie rozwiązanie zostało wykorzystane w niniejszej pracy doktorskiej. Z kolei w przypadku modelowania systemów ogrzewania i chłodzenia najczęściej wykorzystywane są modele idealnie nadążające za potrzebami i zakładające jednocześnie 100% efektywność systemu. Energia końcowa jest obliczana z uwzględnieniem średniej sprawności przesyłu i regulacji ciepła. Takie rozwiązanie, choć jest powszechnie stosowane do oceny rocznego czy sezonowego zużycia energii, powoduje pewien błąd w ocenie wartości chwilowych, ponieważ efektywność systemów zmienia się w zależności od warunków eksploatacyjnych. Sposobem na otrzymanie bardziej zbliżonych wyników do rzeczywistych wartości zużycia energii jest zastosowanie rozbudowanych modeli systemów HVAC. Przykładowo program EnergyPlus oferuje szeroki wybór tych modeli, wśród których można wyróżnić systemy strefowe i centralne. Systemy strefowe składają się jedynie z urządzeń końcowych, tj. grzejników, wentylatorów, klimatyzatorów przyporządkowanych do pojedynczej strefy. Natomiast systemy centralne obsługują wiele stref cieplnych poprzez zbudowanie pętli systemu (np. powietrznej, czynnika grzewczego, chłodniczego), umożliwiając odwzorowanie takich

systemów, jak: VAV (ang. Variable Air Volume), CAV (ang. Constant Air Volume), VRF (ang. Variable Refrigerant Flow), belki chłodzące, wentylacja mechaniczna i wiele innych. Ze względu na ich złożoność do przygotowania wymagana jest znajomość większej ilości danych wejściowych i wiedzy technicznej, co wydłuża czas przygotowania modelu [4, 5].

W niniejszej rozprawie do zamodelowania systemu ogrzewania zaproponowano model 'Heating Plant Loop' składający się ze źródła ciepła, pętli systemu (rur) wraz z pompą obiegową oraz urządzeń końcowych (grzejników wodnych) i uwzględniający straty ciepła, efektywność urządzeń, charakterystykę grzejników czy dynamikę pracy systemu (zmienny przepływ, czas odpowiedzi systemu). Natomiast do zamodelowania mechanicznego chłodzenia wybrano komponenty 'ZoneHVAC:WindowAirConditioner' zastosowane jako pojedyncze klimatyzatory w pomieszczeniach na pobyt ludzi. Tak samo jak model ogrzewania model ten pozwalał na modelowanie zużycia energii (chłodu) z uwzględnieniem strat i sprawności chłodzenia oraz wpływu urządzenia na strefę cieplną (np. generowany hałas czy dodatkowe źródło ciepła powstałe przez wentylator).

Bazując na wynikach symulacji wydajności budynku, ocenę komfortu cieplnego przeprowadza się na podstawie średnich wartości parametrów powietrza w danej strefie cieplnej. Ogranicza to szerszą analizę warunków środowiska cieplnego, w tym zdefiniowanie ewentualnych obszarów dyskomfortu występujących w poszczególnych strefach. Taką możliwość daje połączenie modelowania BPS z CFD zaproponowane w niniejszej pracy doktorskiej. W omawianym przeglądzie literatury co prawda znajdują się publikacje łączące obie grupy programów [67, 70, 71, 97, 128, 129, 131], ale ich głównym celem było otrzymanie informacji o wymianie powietrza w budynku, a nie analizowanie warunków środowiska cieplnego w szerszym ujęciu [70, 71, 128, 131]. W literaturze można znaleźć prace, w których dokonywano oceny komfortu cieplnego w oparciu o model PMV/PPD lub adaptacyjny czy analizowano przepływ powietrza w całym budynku. W części prac [67, 70, 97, 129, 131] przeprowadzono symulacje w programie DesignBuilder z modułem do obliczeń CFD, który daje możliwość oceny warunków cieplnych, przepływu powietrza, ale w żadnej z prac badania te nie dotyczyły chłodzenia pasywnego realizowanego przez otwieranie okien. Co więcej, przy ocenie efektywności wentylacji naturalnej nie analizowano szczegółowo rozkładów parametrów powietrza w pojedynczym pomieszczeniu tak, by móc zdefiniować dokładnie obszary dyskomfortu, jedynie omawiano je w kontekście całego budynku.

Należy zaznaczyć, że istnieją publikacje omawiające szczegółowo składowe kompleksowej oceny chłodzenia pasywnego nieuzdatnionym powietrzem zewnętrznym, bądź w których zastosowano połączenie programów z grupy BPS i CFD czy konsymulacji z programem CONTAM, ale nie ma publikacji łączącej wszystkie omawiane wyżej zagadnienia.

Drugim obszarem wymagającym badań jest modelowanie CFD przepływu powietrza przez stosowane w budownictwie mieszkalnym okno o różnym stopniu rozszczelnienia oraz walidacji opisanego modelu w oparciu o dane pomiarowe pozyskane w rzeczywistym obiekcie. W dotychczasowych badaniach skupiono się głównie na ocenie efektywności wentylacji naturalnej w zależności od parametrów okna (rodzaju, wielkości, lokalizacji,

elementów zacieniających) oraz od jej rodzajów, np. porównując wentylację jednostronną z poprzeczną. Walidacja modeli opierała się na wynikach pomiarów realizowanych w tunelu wiatrowym bądź na podstawie danych empirycznych.

Na koniec należy wspomnieć, że w dotychczasowych badaniach prowadzonych w zespole badawczym wraz z autorką [83-85, 158, 159] skupiono się na ocenie rozwiązań pasywnego chłodzenia budynku powietrzem zewnętrznym wprowadzanym przez okna oraz wentylatory pod kątem zapewnienia komfortu cieplnego i ograniczenia zużycia energii. Symulacje były prowadzone dla klimatu standardowego, rzeczywistego oraz przyszłego. Porównano również wpływ wielkości zastosowanej izolacji budynku na komfort mieszkańców i zapotrzebowanie na ciepło. Efektywność chłodzenia pasywnego była oceniana jednak tylko w ujęciu globalnym, ocenę komfortu dokonywano na podstawie modelu adaptacyjnego. W niniejszej pracy wprowadzono następujące nowości: ocenę rozkładu parametrów powietrza w pomieszczeniu, zastosowanie bardziej wiarygodnego modelu systemów ogrzewania, wentylacji i chłodzenia, w tym prowadzenie kosymulacji, zmiana obiektu badań na bardziej typowy dla aktualnego budownictwa mieszkalnego budynek jednorodzinny oraz przeprowadzenie bardziej rozbudowanej walidacji modelu.

4 Cel i zakres rozprawy

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy wraz ze wskazaniem luki badawczej pozwoliła określić główny cel rozprawy, jakim jest:

Ocena skuteczności konwencjonalnych i alternatywnych sposobów chłodzenia pomieszczeń w budynku jednorodzinnym z wentylacją naturalną z punktu widzenia zapewnienia komfortu cieplnego mieszkańcom, zużycia energii na potrzeby ogrzewania, chłodzenia i wentylacji oraz emisji gazów cieplarnianych do atmosfery w obecnych i przyszłych warunkach klimatycznych.

Osiągnięcie celu głównego wymagało realizacji kilku celów szczegółowych:

1. Zbadanie warunków środowiska wewnętrznego w rzeczywistym domu jednorodzinnym dla oceny skali problemu związanego z zapewnieniem odpowiednich warunków cieplnych w okresie letnim;
2. Zbadanie wpływu czynników, tj.: klimatu zewnętrznego (w tym prędkości wiatru), otwarcia drzwi wewnętrznych, zachowania mieszkańców, automatyzacji otwierania okien na warunki cieplne i zużycie energii w budynku;
3. Zbadanie wpływu pasywnego chłodzenia powietrzem zewnętrznym na rozkład parametrów powietrza w pomieszczeniu;
4. Ocena emisji ditlenku węgla do atmosfery przy zastosowaniu konwencjonalnych i alternatywnych sposobów chłodzenia oraz dla różnych źródeł energii w systemach HVAC.

Do zrealizowania powyższych celów wykonano następujące zadania badawcze:

1. Badania pomiarowe w rzeczywistym budynku (Rozdział 5)
 - Długoterminowe pomiary parametrów środowiska wewnętrznego (temperatura i wilgotność względna powietrza).
 - Krótkoterminowe (jednodniowe) pomiary rozkładu parametrów środowiska wewnętrznego w pomieszczeniu (temperatura i prędkość powietrza) oraz wymiany powietrza.
2. Modelowanie symulacyjne
 - Przygotowanie i walidacja modelu numerycznego BPS połączonego z modelem międzystrefowego przepływu powietrza poprawnie odzwierciedlającego warunki rzeczywistego typowego domu jednorodzinnego (Rozdział 6).
 - Przygotowanie i walidacja modelu numerycznego przepływu powietrza w wybranym pomieszczeniu przy użyciu techniki CFD oraz potwierdzenie jego wiarygodności na podstawie walidacji eksperymentalnej (Rozdział 7).

3. Studium przypadku (Rozdział 8)

- Określenie możliwych strategii chłodzenia budynku.
- Symulacje wielowariantowe zmian w czasie temperatury wewnętrznej i temperatury operatywnej, strumieni powietrza wentylacyjnego, chwilowego zapotrzebowania na energię i/lub zużycia energii oraz symulacje rozkładu w przestrzeni pomieszczenia temperatury i prędkości powietrza, biorąc pod uwagę proponowane strategie chłodzenia budynku.
- Ocena proponowanych rozwiązań pod kątem efektywności energetycznej i środowiskowej budynku.

4. Analiza wpływu proponowanych rozwiązań na środowisko zewnętrzne (Rozdział 9).

Zakresem badań objęto rzeczywisty budynek jednorodzinny zlokalizowany w województwie śląskim. Obiekt wybrano tak, aby odpowiadał typowemu, nowemu budynkowi jednorodzinemu, wybudowanemu w najczęściej stosowanej technologii tradycyjnej, murowanej. Dodatkowo wybór był podyktowany dogodną dla przeprowadzenia pomiarów lokalizacją oraz dostępem do dokumentacji technicznej i samego obiektu.

Jako wskaźnik **efektywności energetycznej** przyjęto chwilowe i sezonowe zapotrzebowanie na ciepło i chłód oraz zużycie ciepła i chłodu w całym budynku. Jako wskaźniki **efektywności środowiskowej** przyjęto liczbę godzin dyskomfortu cieplnego oraz liczbę wymian powietrza w pomieszczeniach przeznaczonych na stały pobyt ludzi (do oceny wpływu na **środowisko wewnętrzne**) oraz emisję ditlenku węgla związaną z eksploatacją systemów HVAC (do oceny wpływu na **środowisko zewnętrzne**).

5 Pomiarowa identyfikacja środowiska wewnętrznego

5.1 Obiekt wybrany do badań

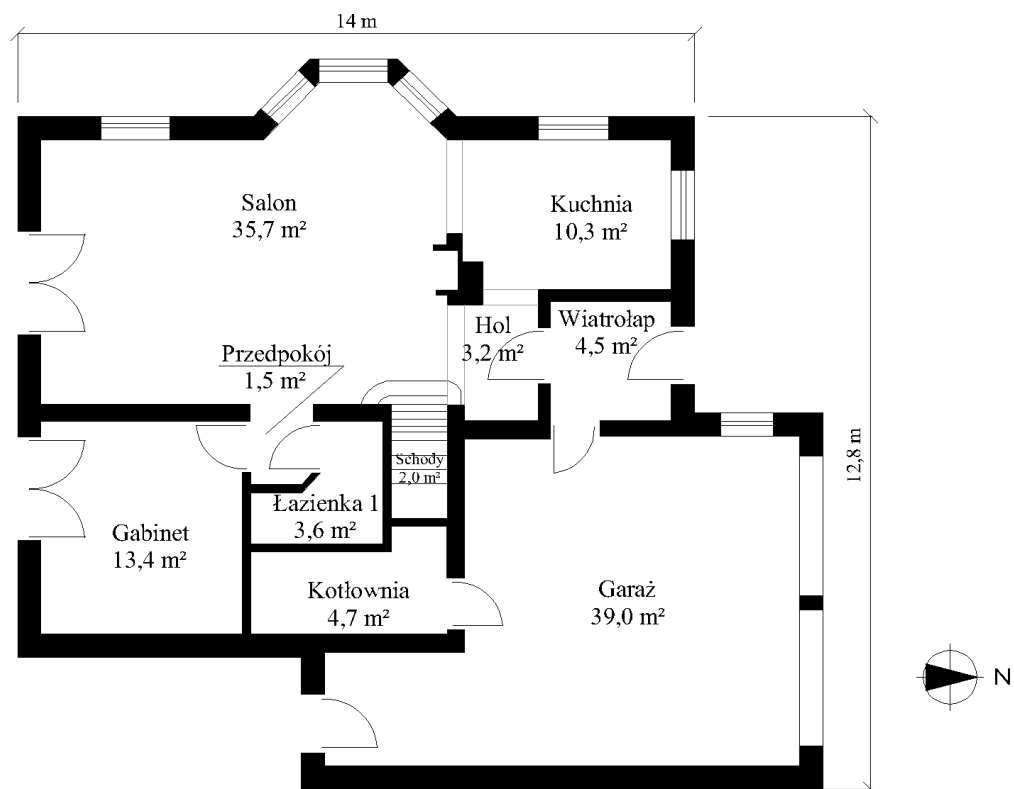
Do badań wybrano dom jednorodzinny wolnostojący, niepodpiwniczony o powierzchni użytkowej 144 m², zlokalizowany w województwie śląskim w Rogoźniku (Rys. 5.1). Budynek został zbudowany w technologii tradycyjnej, murowanej w latach 2012–2013 zgodnie z obowiązującymi wymaganiami podanymi w Warunkach Technicznych [15]. W Tab. 5.1 przedstawiono zestawienie przegród budowlanych wraz z wartościami współczynnika przenikania ciepła U . Budynek składa się z 2 kondygnacji użytkowych: parteru (wiatrołap, hol, kuchnia, salon z jadalnią, gabinet, łazienka), poddasza użytkowego (sypialnia, dwa pokoje, łazienka) oraz nieogrzewanego strychu. Budynek ma system wentylacji naturalnej grawitacyjnej i instalację grzewczą z grzejnikami płytowymi zasilaną z gazowego kotła kondensacyjnego firmy Vaillant oraz pompę ciepła do instalacji ciepłej wody użytkowej firmy Hewalex. Rzuty budynku przedstawiono na Rys. 5.2 i Rys. 5.3.



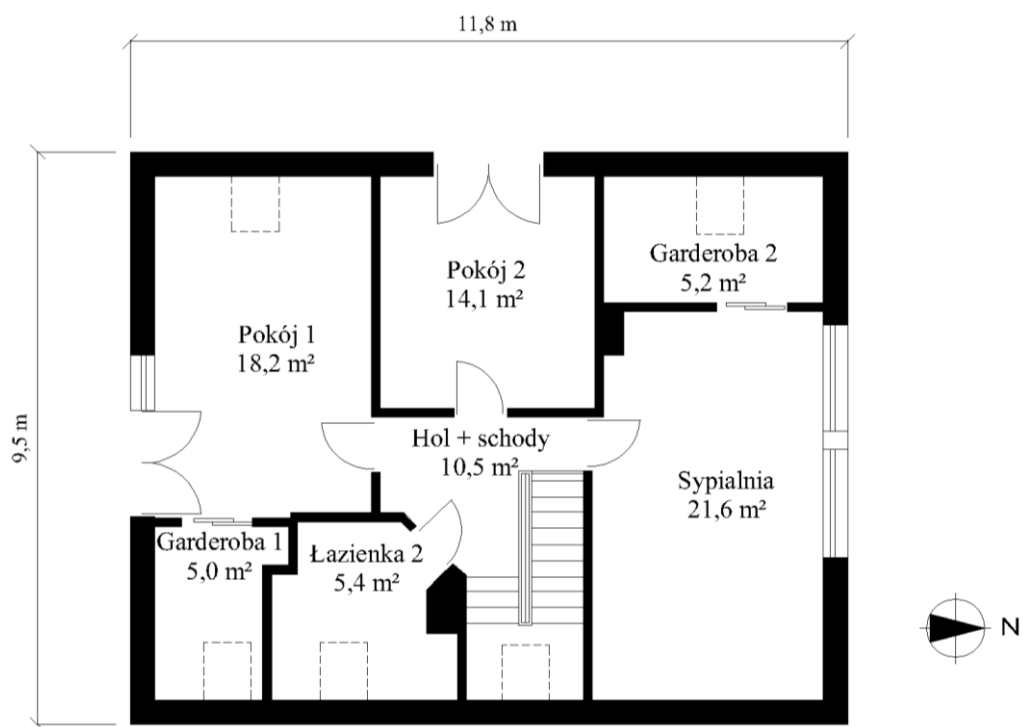
Rys. 5.1. Widok strony północnej domu jednorodzinnego objętego badaniami

Tab. 5.1. Zestawienie przegród budowlanych.

Przegroda	Opis
Ściana zewnętrzna	Pustak ceramiczny „Porotherm” 25 cm, styropian 15 cm, tynk cienkowarstwowy, $U=0,21 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Ściana wewnętrzna konstrukcyjna	Pustak ceramiczny obustronnie otynkowany 25 cm, $U=0,88 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Ściana wewnętrzna działowa na parterze	Cegła kratówka obustronnie otynkowana 12 cm, $U=1,92 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Ściana wewnętrzna działowa na poddaszu	Płyty g-k grubość 12,5 mm na ruszcie metalowym wypełnione wełną mineralną, $U=0,56 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Dach z izolacją	Konstrukcja drewniana pokryta dachówką ceramiczną, wełna mineralna 20 cm, $U=0,24 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Dach bez izolacji	Konstrukcja drewniana pokryta dachówką ceramiczną, $U=4,47 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Podłoga na gruncie	Ławy fundamentowe żelbetowe z betonu żwirowego klasy C16/20 (B20), podbeton 10 cm, styropian 10 cm, $U=0,27 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Podłoga na gruncie w garażu	Ławy fundamentowe żelbetowe z betonu żwirowego klasy C16/20 (B20), podbeton 10 cm, styropian 10 cm, $U=0,42 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Strop między poddaszem a nieogrzewanym strychem	Strop drewniany obudowany płytami g-k F 15mm na ruszcie metalowym, wełna mineralna 45 cm, $U=0,11 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Strop między parterem a poddaszem	Płyty żelbetowe 14 cm, styropian 4 cm, $U=0,58 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Strop nad garażem	Strop z płyt g-k F 15mm na ruszcie metalowym wełna mineralna 45 cm, $U=0,33 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Okno	Okno dwukomorowe Glass Solution-Saint Gobain, rama PCV, $U_{szyby}=0,70 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, $U_{ramy}=0,91 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, $g=52\%$
Okno dachowe	Okno dwukomorowe Glass Solution-Saint Gobain, rama z drewna sosnowego $U_{szyby}=0,60 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, $U_{ramy}=1,1 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, $g=52\%$



Rys. 5.2. Rzut parteru budynku jednorodzinnego



Rys. 5.3. Rzut piętra budynku jednorodzinnego

5.2 Metodyka badań

W budynku opisanym w rozdz. 5.1 przeprowadzono badania terenowe in-situ w celu oceny rzeczywistych warunków cieplnych i uzyskania danych niezbędnych do wykonania walidacji modeli numerycznych.

5.2.1 Pomiar temperatury i wilgotności względnej powietrza

Ciągły monitoring parametrów powietrza wewnętrznego: temperatury i wilgotności względnej prowadzono przez cały rok od 1 czerwca 2020 r. do 31 maja 2021 r. Dane rejestrowano z 15-minutowym krokiem czasowym przy użyciu rejestratorów AR235 (APAR Control, Raszyn, Polska) [160]. Zakres pomiarowy temperatury mieścił się w granicach od -30°C do 80°C ; dokładność czujnika wynosiła $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Zakres pomiarowy wilgotności wynosił od 0% do 100% z dokładnością $\pm 3\%$. Mierniki rozmieszczono we wszystkich pomieszczeniach przeznaczonych na stały pobyt ludzi (salon, gabinet, kuchnia, pokój 1, pokój 2, sypialnia) oraz w łazience na piętrze i na nieużytkowym strychu. Ze względu na to, że kuchnia i salon stanowią jedną strefę, nie są oddzielone ścianą działową, wyniki pomiarów z dwóch czujników uśredniono do analizy. Czujniki nie były narażone na bezpośrednie działanie promieniowania słonecznego i źródeł ciepła; umieszczono je w miejscu umożliwiającym swobodny przepływ powietrza wokół czujników (Rys. 5.4a). Ze względu na problemy techniczne rejestrację w pokoju 2 rozpoczęto od 7 lipca 2020 r. Przed przystąpieniem do pomiarów została przeprowadzona interkalibracja czujników w celu umożliwienia porównywania ich wskazań. W tym celu wszystkie rejestratory zostały umieszczone w jednym pomieszczeniu, na okres od 26–29 maja 2020 r. Z otrzymanych pomiarów dla tego okresu przeprowadzono obliczenia, których efektem były poprawki dla wartości temperatury i wilgotności względnej.

W trakcie badań w budynku przebywały na stałe 2 osoby dorosłe, z których jedna ma normowany czas pracy i zwykle przebywała poza domem (w tygodniu) między 7:00 a 16:00. Czas przebywania drugiej osoby jest trudny do ujednolicenia (nienormowany czas pracy); jednak zwykle była ona kilka godzin dziennie poza domem.

5.2.2 Ocena wymiany powietrza metodą gazu znacznikowego

Ocenę wymiany powietrza metodą zaniku gazu znacznikowego prowadzono w trzech blokach: w okresie letnim od 4 do 6 sierpnia 2020 r., okresie przejściowym od 21 do 24 października 2020 r. oraz w okresie zimowym od 18 do 21 stycznia 2021 r. Do badań wybrano dwa pomieszczenia: pokój 1 oraz pokój 2 znajdujące się na piętrze budynku. W czasie prowadzenia badań mieszkańcy nie mogli korzystać z pomieszczeń i drzwi do nich były zamknięte. Drzwi i okna do innych pomieszczeń nie były natomiast w tym czasie kontrolowane (normalne użytkowanie budynku). Pomiary zostały wykonane zgodnie z normą ISO 12569: 2017 [161]. Jako gaz znacznikowy zastosowano ditlenek węgla w postaci suchego lodu, ponieważ jest prosty w użyciu i tani (Rys. 5.4b). Każde pomieszczenie traktowane było jako pojedyncza strefa, w której stężenie ditlenku węgla powinno utrzymywać się na jednolitym poziomie. Gaz znacznikowy powinien być tak wymieszany, aby jego stężenie wahało się nie więcej niż 10% od średniej wartości w obrębie strefy. Z tego powodu w czasie dozowania gazu użyto wentylatorów

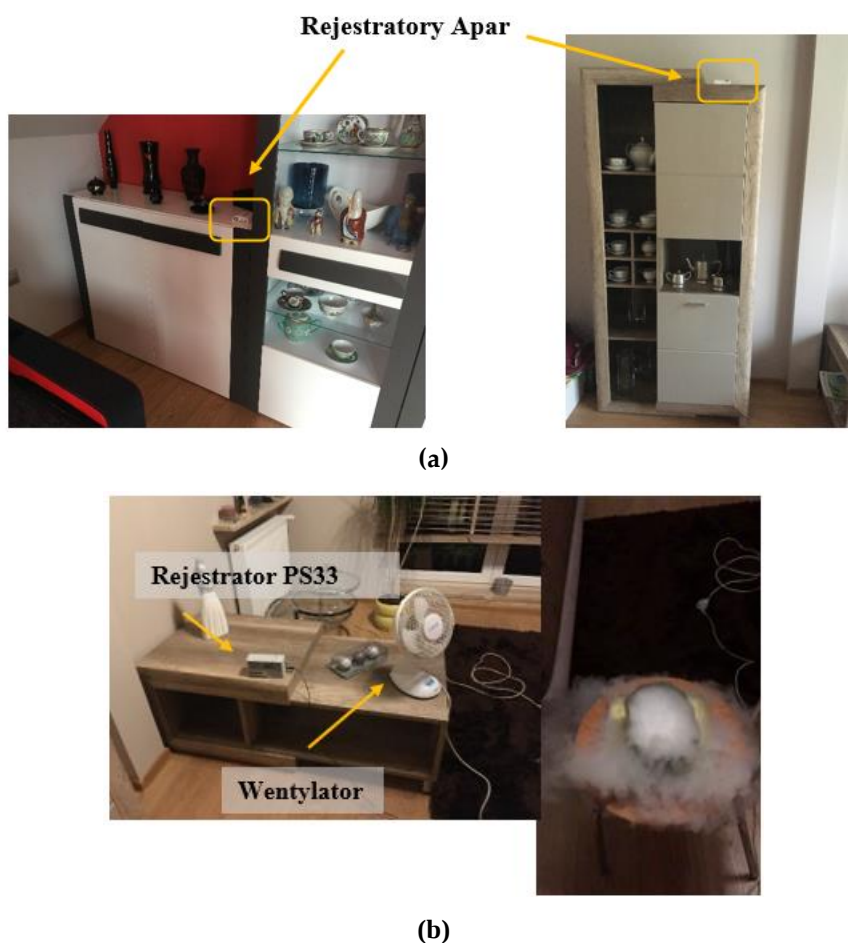
mieszających. W pokoju 1 znajdowały się trzy, a w pokoju 2 dwa rejestratory stężenia gazu znacznikowego: monitory jakości powietrza wewnętrznego PS33 (Sensotron, Gliwice, Polska [162]) o zakresie pomiarowym do 5000 ppm, rozdzielczości wskazań 1 ppm i niepewności wskazań $\pm 20 \text{ ppm} + 3\%$ mierzonej wartości (Rys. 5.5).

Dozowanie ditlenku węgla przeprowadzano do stężenia 5000 ppm. Po osiągnięciu tej wartości przerywano dozowanie i rejestrowano zanik stężenia z 1-minutowym krokiem czasowym. Pomiary prowadzone były przy zamkniętym oknie. Z odczytanych wartości stężenia gazu znacznikowego wybrano odpowiedni zakres tak, aby jak najlepiej dopasować aproksymowaną krzywą zaniku zgodnie z zależnością (1). W rezultacie otrzymano liczbę wymian powietrza. Obliczenia przeprowadzono dla każdego punktu pomiarowego i każdego dozowania.

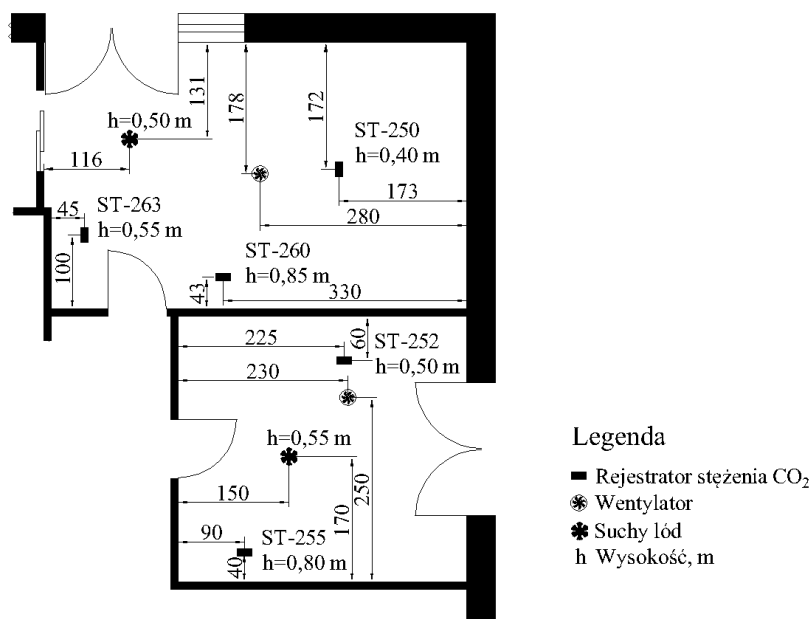
$$C(\tau) = C(\infty) + [C(0) - C(\infty)] \cdot \exp(-N \cdot \tau) \quad (1)$$

gdzie:

$C(\tau)$ - stężenie znacznika w chwili τ , (ppm), $C(\infty)$ - tło stężenia znacznika w powietrzu (ppm), $C(0)$ - stężenie znacznika dla $\tau = 0$ (ppm), N - liczba wymian powietrza w pomieszczeniu, (h^{-1}).



Rys. 5.4. Lokalizacja sprzętu pomiarowego a) do pomiaru temperatury i wilgotności; b) do pomiaru zaniku stężenia; prezentowany jest moment dozowania gazu znacznikowego



Rys. 5.5. Rozmieszczenie wentylatorów, rejestratorów oraz dozowników suchego lodu w badanych pomieszczeniach

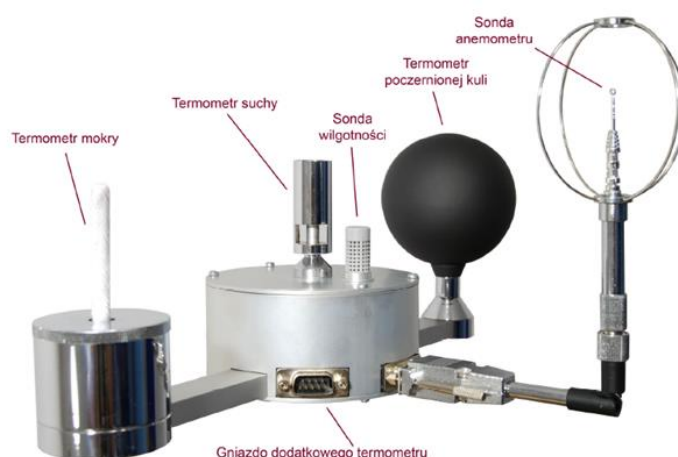
5.2.3 Badania komfortu cieplnego

Ocenę wpływu stopnia rozszczelnienia okna na odczucie komfortu cieplnego osób przebywających w pomieszczeniach przeprowadzono na podstawie wskaźników: przewidywanej średniej oceny komfortu cieplnego PMV, przewidywanego odsetka osób niezadowolonych PPD i ryzyka przeciągu DR. Ten model komfortu cieplnego pozwala uwzględnić nie tylko wpływ temperatury, ale także prędkości powietrza na odczucia cieplne człowieka [163]. Pomiary wykonano w sezonie grzewczym 15 stycznia 2021 r. w pokojach 1 i 2. Badania prowadzono przy zamkniętym oknie, mikrouchyle okna oraz przy uchylonym skrzydle okiennym. Pomiary wykonano miernikiem mikroklimatu SensoData 5500 MK (Rys. 5.6) firmy Sensor Electronic, Gliwice, Polska [164]. Dane techniczne zastosowanych sond pomiarowych przedstawiono w Tab. 5.2. Miernik umożliwia określenie wskaźników PMV, PPD i DR na podstawie pomiaru temperatury i prędkości powietrza, ciśnienia cząstkowego pary wodnej oraz średniej temperatury promieniowania przegród.

Moduły pomiarowe zostały ustawione na czterech wysokościach: 0,1 m, 0,6 m, 1,1 m, 1,7 m, w celu równoczesnego wykonania pomiarów dla osób stojących i siedzących. Do obsługi modułów SensoData 5500 wykorzystano oprogramowanie Thermal Conditions. W programie zostały ustawione dane dotyczące parametrów charakteryzujących człowieka, tj. aktywność fizyczna oraz izolacyjność cieplna odzieży. Wartość metabolizmu wprowadzono równą 1,0 met z względu na wypoczynkowy charakter pomieszczeń, a izolacyjność cieplną 1,0 clo, co odpowiada ubiorowi typowemu dla okresu zimowego.

Tab. 5.2. Dane techniczne sond pomiarowych [164]

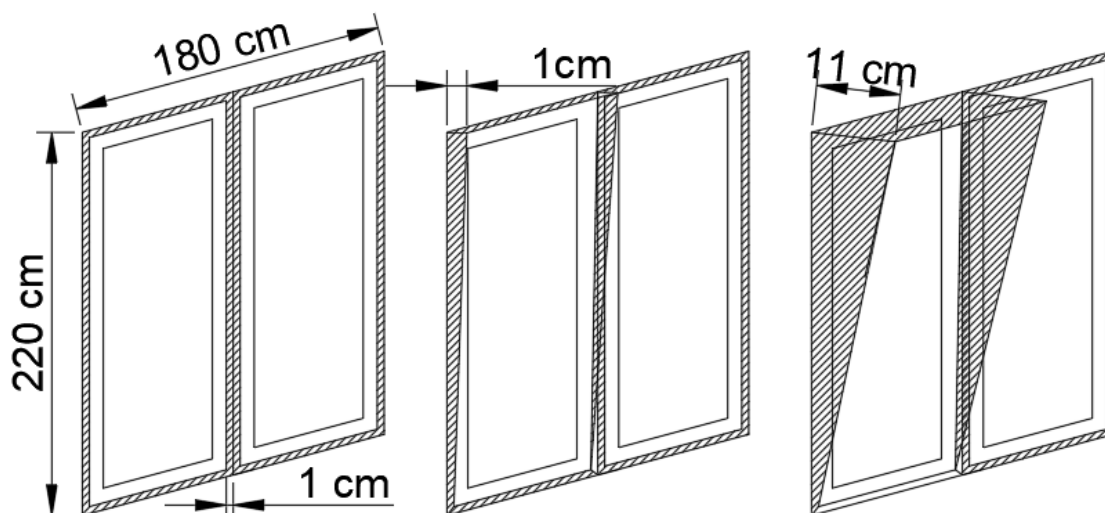
Sonda	Parametr	Zakres pomiarowy	Dokładność
Sonda temperatury – Czujnik Pt-100	Temperatura powietrza	-20–50°C	±0,1°C
	Temperatura poczerwionej kuli	-20–120°C	±0,1°C
	Temperatura naturalna wilgotna	0–50°C	±0,1°C
Sonda wilgotności względnej	Wilgotność względna	0–100%	±2% w zakresie 10–90% RH
Sonda ciśnienia barometrycznego	Ciśnienie barometryczne	500–1500 hPa	±3 hPa
Sonda anemometryczna – czujnik wielokierunkowy, sferyczny	Prędkość powietrza	0,05–5 m/s	±0,02 m/s ±1,5%



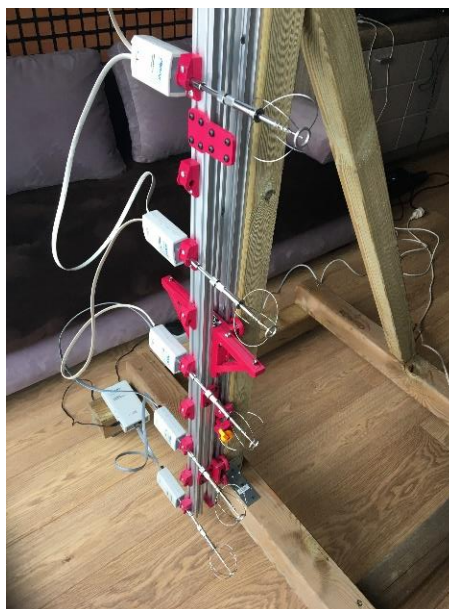
Rys. 5.6. Moduł pomiarowy SensoData 5500 [164]

5.2.4 Pomiar prędkości strugi powietrza

Pomiary prędkości strugi powietrza wpływającego przez okna przeprowadzono dnia 15 stycznia 2021 r. w pokoju nr 2. Wykonano je dla trzech konfiguracji otwarcia okna balkonowego o wymiarach 2,2×1,8 m: mikrouchyłu, zamkniętego, uchylonego (otwartego) (Rys. 5.7). Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów wykonano próbę z dymem w celu ustalenia kierunku powietrza nawiewanego przez szczelinę. Pomiary były wykonane przy pomocy termoanemometrów HT-428 firmy Sensor Electronic Gliwice, Polska [164] umiejscowionych na specjalnej drewnianej konstrukcji (platformie) (Rys. 5.8). Dokładność pomiarową sondy anemometrycznej zestawiono w Tab. 5.2. Zastosowano 8 sond anemometrycznych rozmieszczonych co 20 cm, począwszy od wysokości 0,18 m nad podłogą. Platforma przed każdą serią pomiarową była przemieszczona w linii prostej o 0,10 m (okno zamknięte) lub 0,20 m (mikrouchył i uchylone), zaczynając od odległości 0,25 m od okna. Czas trwania jednego pomiaru wynosił 5 minut z czasem uśredniania parametrów wynoszącym 30 sekund. Pomiary były wykonywane bez obecności ludzi.



Rys. 5.7. Badane konfiguracje otwarcia okna: a) okno zamknięte, b) mikrouchylone, c) uchylone (otwarte)



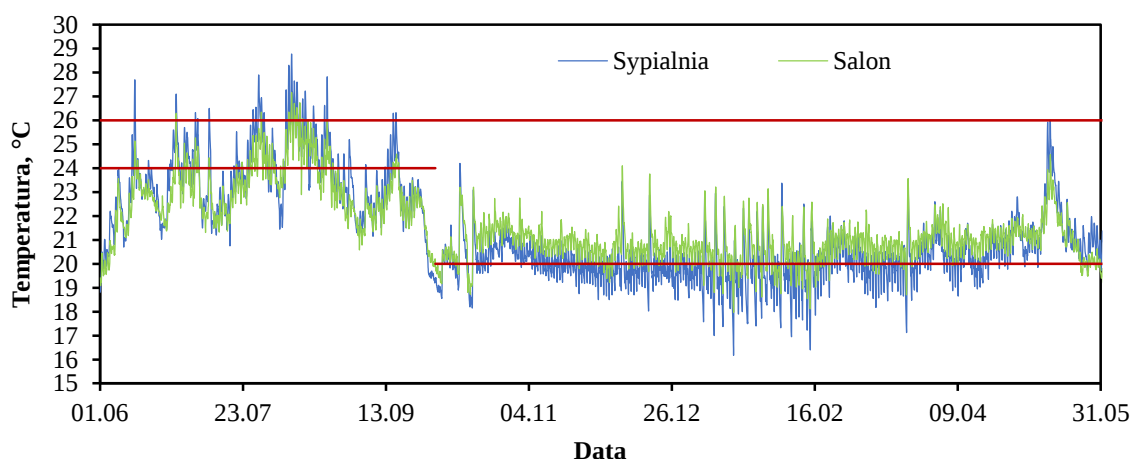
Rys. 5.8. Stanowisko do pomiarów pionowego rozkładu prędkości powietrza wewnętrznego w pomieszczeniu

5.3 Wyniki

Badania eksperymentalne, przeprowadzone zgodnie z metodyką podaną w rozdziale 5.2, umożliwiły analizę środowiska wewnętrznego oraz ocenę wentylacji naturalnej w wybranym pomieszczeniu. Ocena środowiska cieplnego obejmowała analizę wyników uzyskanych z długotrwałych pomiarów temperatury i wilgotności względnej oraz komfortu cieplnego. Natomiast w ramach diagnostyki wentylacji naturalnej wykonano analizę wymiany powietrza w pomieszczeniu dla okresu letniego, przejściowego i zimowego.

5.3.1 Ocena środowiska cieplnego

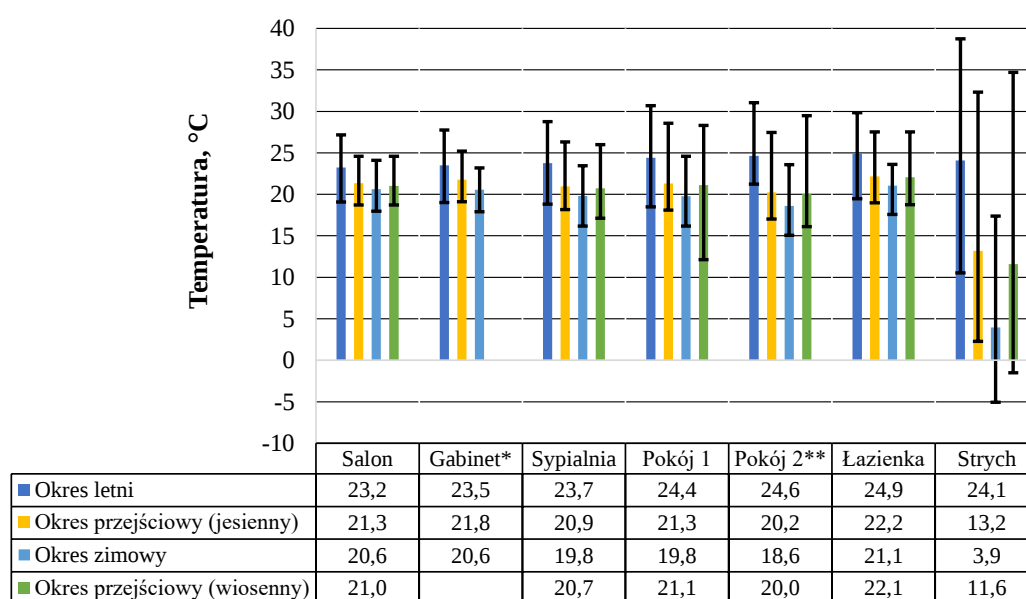
Analizę środowiska podzielono na 3 okresy: letni, przejściowy i zimowy. Rys. 5.9 ilustruje przebieg zmienności temperatury w salonie i sypialni wraz z zaznaczonymi zakresami temperatury obliczeniowej (20–26°C) spełniającymi wymagania drugiej kategorii środowiska wg normy PN EN 16798-1:2019 [47] oraz najbardziej pożądanym zakresie dla okresu letniego (24–26°C), który jest typowo uwzględniany przy projektowaniu systemów chłodzenia. Uzyskane wartości średnie, maksymalne oraz minimalne temperatury i wilgotności odnotowane w pomieszczeniach dla poszczególnych okresów zostały przedstawione na Rys. 5.10 i Rys. 5.11. W każdym okresie badawczym w większości pomieszczeń najczęściej występowała temperatura w zakresie 20–24°C. Zakładając małą różnicę pomiędzy temperaturą powietrza i temperaturą operatywną (patrz rozdz. 5.3.2) możemy zaklasyfikować pomieszczenia wg normy PN EN 16798-1:2019 [32] do I kategorii dla okresu letniego oraz przejściowego, natomiast do II kategorii dla okresu zimowego. Z uwagi na problematykę pracy związaną z chłodzeniem budynku szczegółową analizę środowiska cieplnego przedstawiono dla okresu letniego.



Rys. 5.9. Przebieg zmienności temperatury w okresie pomiarowym w salonie i sypialni z zaznaczonymi granicznymi wartościami temperatury komfortu 20–26°C oraz optymalnej dla okresu letniego 24–26°C

Okres letni rozpatrywano od 1 czerwca do 31 sierpnia 2020 r.; liczył on 2208 godzin (za wyjątkiem pokoju 2, gdzie rejestracja trwała 1327 h). Średnia temperatura powietrza wewnętrznego mieściła się w zakresie od 23,2°C do 24,9°C. Największą zmienność temperatury zaobserwowano na strychu (28,2°C), natomiast wśród pomieszczeń przeznaczonych na stały pobyt ludzi w pokoju 1 (12,2°C) (Rys. 5.10). Najniższą maksymalną temperaturę zmierzono w salonie z otwartą kuchnią (27,2°C), jej wartość nieznacznie przekracza temperaturę obliczeniową 26°C. Wynik jest zaskakujący z uwagi na to, że kuchnia jest pomieszczeniem o największych chwilowych zyskach wewnętrznych (gotowanie posiłków), a w salonie występowało duże oszklenie ścian zewnętrznych. To pomieszczenie ma też najniższą temperaturę średnią w sezonie letnim. Przez większość czasu w pomieszczeniach panowały warunki spełniające wymagania II kategorii środowiska cieplnego. W żadnym z pomieszczeń udział godzin, w których występowała temperatura powyżej 26°C, nie przekroczył 30%, a temperatura poniżej 20°C występowała w znikomym udziale (maks. 3% sezonu w salonie). Tab. 5.3 prezentuje procentowy udział

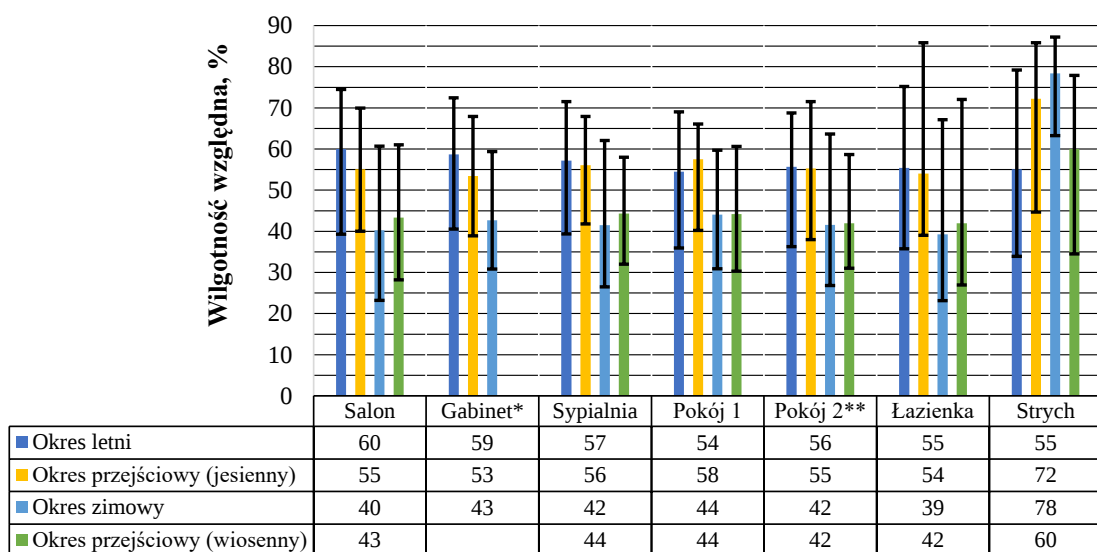
godzin z temperaturą w określonych zakresach. W salonie oraz gabinecie odnotowano najmniejsze okresy z temperaturą powyżej 26°C wynoszące 2% oraz 5%. Salon połączony z kuchnią ma dużą kubaturę, przy małej powierzchni ściany zewnętrznej zlokalizowanej na południe, co sprawia, że zyski ciepła wewnętrzne oraz zewnętrzne nie są w stanie znacząco wpłynąć na temperaturę. Druga ściana salonu zlokalizowana na zachód jest częściowo zacieniona przez sąsiedni budynek. W tych pomieszczeniach odnotowano również największy udział występowania temperatury poniżej 20°C. Na piętrze udział czasu z temperaturą powyżej 26°C osiągnął najwyższą wartość w łazience (26%), następnie w pokoju 2 (21%) oraz pokoju 1 (20%). Pokoje zlokalizowane są na stronę południową i/lub zachodnią. W sypialni znajdującej się w północnej części budynku udział wyniósł 9%. Przez ok. 3/4 okresu letniego w pomieszczeniach na parterze występowała temperatura z zakresu 20–24°C, a przez ok. 1/4 okresu była w najbardziej pożądanym zakresie 24–26°C, z czego można wywnioskować, że na parterze budynku w okresie letnim panują dobre warunki cieplne dla mieszkańców. Gorsze warunki środowiska cieplnego wystąpiły w pomieszczeniach na poddaszu ze względu na to, że strumień ciepłego powietrza z pomieszczeń na parterze unosił się do góry i dodatkowo je ogrzewał. Dobowe zmiany temperatury w pomieszczeniach stałego przebywania ludzi wahały się w zakresie od 0,3°C do 6,7°C, największą różnicę zaobserwowano 10 lipca w pokoju 1, a najmniejszą 19 czerwca w salonie.



*Pomiary były przeprowadzone do 1 lutego 2021 roku

**Pomiary przeprowadzono od 8 lipca 2020 roku

Rys. 5.10. Średnia temperatura oraz maksymalna i minimalna odchyłka występująca w pomieszczeniach w rozpatrywanych okresach



*Pomiary były przeprowadzone do 1 lutego 2021 roku

**Pomiary przeprowadzono od 8 lipca 2020 roku

Rys. 5.11. Średnia wilgotność względna oraz maksymalna i minimalna odchyłka występująca w pomieszczeniach w rozpatrywanych okresach

Wilgotność względna powietrza w pomieszczeniach nie spadła poniżej 30%. Największą różnicę pomiędzy wartością maksymalną (86%) a minimalną (35%) stwierdzono w łazience. Różnica ta mogła wynikać z dodatkowych zysków wilgoci powstających podczas kąpieli. Wartość wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniach powinna zawierać się w granicach 40–60%. Średnia wilgotność powietrza praktycznie w każdym pomieszczeniu mieściła się w zalecanym zakresie, jedynie w kuchni została przekroczona o 1%.

Tab. 5.3. Procentowy udział godzin z temperaturą w podanych zakresach dla okresu letniego

Pomieszczenie/Zakres	<20°C	20–24°C	24–26°C	>26°C
Salon	3%	69%	26%	2%
Gabinet	2%	64%	29%	5%
Sypialnia	1%	59%	31%	9%
Pokój 1	1%	46%	33%	20%
Pokój 2	0%	44%	35%	21%
Łazienka 2	0%	31%	43%	26%

Okres przejściowy rozpatrywano od 1 września do 30 listopada 2020 r. oraz od 1 marca do 31 maja 2021 r., natomiast okres zimowy od 1 grudnia 2020 r. do 28 lutego 2021 r. Średnia temperatura powietrza w pomieszczeniach przeznaczanych na stały pobyt ludzi mieściła się w zakresie od 20,0°C do 22,2°C dla okresu przejściowego oraz od 18,5°C do 21,0°C dla okresu zimowego. Występowanie niższych wartości temperatury w okresie zimowym (nawet 90% czasu w przypadku pokoju 2) spowodowane było indywidualnymi preferencjami mieszkańców. W pomieszczeniach na parterze bardzo rzadko występowały temperatury poniżej 20°C (do 10% w salonie) oraz nie występowały okresy powyżej 26°C,

w związku z czym liczba godzin dyskomfortu była niska. Dobowe zmiany temperatury wyniosły od 0,3°C do 10,4°C dla okresu przejściowego i 0,3–7,4°C dla zimowego. Największe różnice w okresach przejściowych odnotowano w pokoju 1, w zimowym w pokoju 2 ze względu na okresowe korzystanie z tych pomieszczeń i brak potrzeby ogrzewania ich stale do temperatury 20°C. Średnia wilgotność względna powietrza wewnętrznego mieściła się w zalecanych zakresie i wynosiła 55–58% dla okresu przejściowego oraz 41–44% dla okresu zimowego.

5.3.2 Ocena komfortu cieplnego

Na podstawie wyników pomiarów (Tab. 5.4 i Tab. 5.5) oraz wymagań normy PN-ISO 7726:2001 [165] środowisko w analizowanych pomieszczeniach określono jako jednorodne zarówno przy całkowicie zamkniętym oknie dla pozycji stojącej i siedzącej (pokój 1 i 2), jak i przy mikrouchylenie dla pozycji stojącej (pokój 2) i siedzącej (pokój 1 i 2). Do oceny rodzaju badanego środowiska przyjęto jako główne kryterium odchyłkę temperatury powietrza między jej wartością średnią a wartościami zmierzonymi (dla pozycji stojącej średnia z wysokości 1,7 m, 1,1 m, 0,1 m, dla pozycji siedzącej średnia z wysokości 1,1 m, 0,6 m, 0,1 m). Wartość dopuszczalną odchyłki dla środowiska jednorodnego, wynoszącą 1,5°C, obliczono na podstawie normy [165]. Maksymalną odchyłkę 1,5°C zanotowano w pokoju 2 (pozycja siedząca, mikrouchylenie). Natomiast dla okna uchylonego (pokój 1 i 2) dla pozycji stojącej i siedzącej oraz mikrouchylenia w pozycji stojącej (pokój 1) środowisko termiczne klasyfikowało się jako niejednorodne. Odchyłka w skrajnym przypadku wynosiła 3,2°C (pozycja stojąca, okno uchylone, pokój 2). Było to spowodowane nawiewem większej ilości zimnego powietrza z zewnątrz przez uchylone okno. W przypadku pozostałych mierzonych wielkości, branych pod uwagę przy ocenie rodzaju środowiska: średniej temperatury promieniowania, prędkości powietrza i ciśnienia pary wodnej, wartości odchyłki mieściły się w dopuszczalnych granicach dla środowiska jednorodnego dla wszystkich przypadków.

Przy zamkniętym oknie w obu pomieszczeniach wskaźniki PPD, PMV nie mieściły się w wymaganych zakresach dla kategorii A, B, C zgodnie z normą PN EN ISO 7730 [166] (Tab. 5.6 i Tab. 5.7). Wskaźnik DR oraz pionowy gradient temperatury mieściły się w zakresie kategorii A, jednak w celu klasyfikacji pomieszczenia należy wybrać najgorszą kategorię, w której mieści się dany współczynnik. Wobec tego pomieszczenie należy zaklasyfikować do kategorii D – pomieszczenie przeznaczone na pobyt ludzi tylko na krótki czas. Otrzymane wyniki w tym przypadku mogą wynikać z faktu, że pomieszczenia te nie są użytkowane przez mieszkańców całodobowo, a ogrzewanie w czasie braku potrzeby korzystania z pomieszczeń zostaje wyłączone. Wyniki pomiarów wykonywanych z oknem uchylonym i mikrouchylnym również ostatecznie klasyfikują pomieszczenia do kategorii D.

Wartości temperatury powietrza wewnętrznego i temperatury operatywnej na danej wysokości dla wszystkich konfiguracji otwarcia okna (za wyjątkiem wysokości 1,1 m przy uchylonym oknie) były zbliżone, maksymalna odchyłka wyniosła 0,6°C w pokoju 1 i 0,4°C w pokoju 2. Przy czym odchyłka nie występowała zawsze w jedną stronę, czasami wartość temperatury powietrza była wyższa a czasami niższa od wartości temperatury operatywnej,

ale praktycznie zawsze w granicach dokładności pomiarowej. Uzyskane wyniki potwierdzają, że założenie przyjęte w rozdz. 5.3.1 o małych różnicach w wartościach temperatury powietrza i operatywnej jest prawidłowe, co pozwoliło w analizach zastosować model komfortu adaptacyjnego w odniesieniu do temperatury powietrza.

Tab. 5.4. Parametry mikroklimatu – pokój 1

Parametr	t_i	t_g	v_i	SD	T_a	DR	t_{mr}	t_o	PMV	PPD
Wys [m]	[°C]	[°C]	[m/s]	[m/s]	[%]	[%]	[°C]	[°C]	[-]	[%]
Zamknięte okno										
1,7	20,3	20,0	0	0,002	0	0	19,9	20,1	-0,86	20,7
1,1	20,2	19,9	0	0	0	0	19,9	20,0	-0,89	21,6
0,6	19,9	19,8	0	0	0	0	19,8	19,9	-0,94	23,5
0,1	19,3	19,4	0	0,002	0	0	19,4	19,3	-1,09	29,9
Mikrouchyl										
1,7	20,5	19,9	0	0	0	0	19,7	20,1	-0,87	20,9
1,1	20,2	19,8	0	0	0	0	19,6	19,9	-0,93	23,4
0,6	19,8	19,5	0	0	0	0	19,4	19,6	-1,02	27,1
0,1	17,8	18,6	0	0	0	0	19,0	18,4	-1,39	44,7
Uchylone okno										
1,7	20,5	20,0	0	0,003	100,0	0	19,8	20,1	-0,86	20,6
1,1	20,2	19,8	0,02	0,020	100,0	0	19,7	20,0	-0,91	22,4
0,6	19,6	19,6	0,06	0,019	34,0	2,6	19,6	19,6	-1,02	27,0
0,1	16,0	18,4	0,15	0,056	37,4	24,5	20,4	18,2	-1,65	59,1

Tab. 5.5. Parametry mikroklimatu – pokój 2

Parametr	t_i	t_g	v_i	SD	T_u	DR	t_{mr}	t_o	PMV	PPD
Wys [m]	[°C]	[°C]	[m/s]	[m/s]	[%]	[%]	[°C]	[°C]	[-]	[%]
Zamknięte okno										
1,7	20,2	19,7	0,02	0,01	47,1	0	19,5	19,9	-0,93	23,2
1,1	20,0	19,6	0	0	0	0	19,5	19,7	-0,97	24,7
0,6	19,5	19,3	0	0	100	0	19,3	19,4	-1,07	29,1
0,1	18,3	18,5	0,07	0,02	22,1	5,6	18,5	18,4	-1,34	42,5
Mikrouchyl										
1,7	20,1	19,5	0,03	0,01	29,8	0	19,3	19,7	-0,97	24,8
1,1	19,9	19,5	0	0	0	0	19,3	19,6	-1,0	26,1
0,6	19,4	19,1	0	0	0	0	19,0	19,2	-1,11	31,2
0,1	18,1	18,4	0,10	0,02	19,8	9,3	18,5	18,3	-1,37	43,9
Uchylone okno										
1,7	20,0	19,4	0,02	0,01	46,6	0	19,2	19,6	-1,00	26,2
1,1	19,4	19,1	0,02	0,02	92,7	0	19,1	19,2	-1,11	30,9
0,6	18,2	18,4	0,10	0,02	17,0	10,3	18,6	18,4	-1,35	42,9
0,1	14,9	17	0,13	0,06	44,8	23,5	18,6	16,7	-1,94	73,8

Tab. 5.6. Zestawienie wskaźników PMV, PPD, DR i pionowego gradientu temperatury - pokój 1

Pozycja stojąca				Pozycja siedząca			
PMV	PPD	DR	Pionowy gradient temperatury	PMV	PPD	DR	Pionowy gradient temperatury
Okno zamknięte							
-0,89	21,60%	0%	1,0%	-0,94	23,50%	0%	1,0%
Mikrouchyl							
-0,93	23,40%	0%	4,8%	-1,02	27,10%	0%	3,5%
Okno uchylone							
-1,14	34,03%	24,50%	18,0%	-1,19	36,17%	24,50%	14,0%

Tab. 5.7. Zestawienie wskaźników PMV, PPD, DR i pionowego gradientu temperatury - pokój 2

Pozycja stojąca				Pozycja siedząca			
PMV	PPD	DR	Pionowy gradient temperatury	PMV	PPD	DR	Pionowy gradient temperatury
Okno zamknięte							
-0,97	24,70%	9,3%	2,3%	-1,07	29,10%	9,3%	1,7%
Mikrouchyl							
-1	26,10%	0%	4,8%	-1,11	31,20%	0%	3,5%
Okno uchylone							
-1,35	43,63%	23,50%	27,0%	-1,47	49,20%	23,50%	18,0%

5.3.3 Ocena wentylacji naturalnej

W Tab. 5.8 zamieszczono zestawienie obliczonej liczby wymian powietrza dla każdego punktu pomiarowego w kolejnych okresach pomiarowych oraz średnią liczbę wymian i średni strumień powietrza wentylacyjnego w pomieszczeniach. Krzywe zaniku stężenia, na podstawie których wykonano obliczenia, zamieszczono w załączniku nr 1.

Z badań wynika, że strumień powietrza był z reguły niższy od zalecanego normą PN-EN 16798-1:2019-06 [47] wynoszącego od 14,4 m³/h do 36,0 m³/h na osobę w zależności od kategorii środowiska wewnętrznego. Dwa razy udało się zarejestrować strumień

w granicach najniższej III kategorii środowiska (zakładając, że w pomieszczeniu przebywa tylko jedna osoba). W pokoju 1 uzyskano większe wartości strumienia powietrza wentylacyjnego niż w pokoju 2, wpływ na to ma długość szczelin okiennych. W pokoju 1 są dwa okna dachowe oraz większe drzwi balkonowe, natomiast w pokoju 2 są tylko drzwi balkonowe. Największą wymianę powietrza w obu pomieszczeniach zanotowano dla okresu letniego. W okresie tym mieszkańcy mieli duży wpływ na wielkość strumienia powietrza wentylacyjnego przez otwieranie okien w sąsiednich pomieszczeniach, co powodowało zwiększenie przepływu powietrza w całym budynku. W czasie pomiarów na stałe były uchylone okna w sypialni, która znajduje się po przeciwległej stronie pokoju 1. Drzwi wewnętrzne w pomieszczeniach ocenianego budynku są bardzo nieszczelne. W okresie przejściowym oraz zimowym otwieranie okien powodowałoby wychłodzenie budynku z tego powodu okna pozostawały przez większość czasu zamknięte. Średnia liczba wymian obliczona dla okresu letniego wynosiła $0,28 \text{ h}^{-1}$ dla pokoju 1 oraz $0,22 \text{ h}^{-1}$ dla pokoju 2, co nie odbiega znacząco od wyników pomiarów prezentowanych w literaturze [167].

Wybrane aspekty diagnostyki cieplnej badanego budynku wraz z oceną zostały opisane przez autorkę w rozdziale monografii [168].

Tab. 5.8. Liczba wymian powietrza N obliczona dla poszczególnych lokalizacji mierników i strumień powietrza wentylacyjnego $\dot{V}$ w pomieszczeniach

pokój 1						pokój 2				
Miernik	1	2	3	średnia	$\dot{V}$, m ³ /h	Miernik	4	5	średnia	$\dot{V}$, m ³ /h
Dozowa- nie	N, h ⁻¹					Dozowa- nie	N, h ⁻¹			
okres letni										
I	0,33	0,35	0,32	0,33	16,8	I	0,23	0,19	0,21	7,9
II	0,20	0,20	0,18	0,19	9,8	II	0,19	0,19	0,19	7,2
III	0,30	0,33	0,35	0,33	16,5	III	0,23	0,28	0,25	9,5
$\dot{V}_{\dot{s}r}$, m ³ /h					13,2	$\dot{V}_{\dot{s}r}$, m ³ /h				8,2
okres przejściowy										
I	0,09	0,09	0,09	0,09	4,5	I	0,06	0,09	0,08	2,8
II	0,12	0,10	0,11	0,11	5,6	II	0,07	0,10	0,08	3,1
III	0,10	0,10	0,09	0,10	4,8	III	0,07	0,08	0,07	2,8
$\dot{V}_{\dot{s}r}$, m ³ /h					5,0	$\dot{V}_{\dot{s}r}$, m ³ /h				2,9
okres zimowy										
I	0,22	0,21	0,20	0,21	10,6	I	0,10	0,13	0,11	4,2
II	0,24	0,25	0,25	0,24	12,4	II	0,09	0,08	0,09	3,2
III	0,20	0,20	0,24	0,21	10,8	III	0,09	0,14	0,11	4,3
IV	0,17	0,17	0,17	0,17	8,4	IV	0,10	0,21	0,16	5,9
$\dot{V}_{\dot{s}r}$, m ³ /h					10,6	$\dot{V}_{\dot{s}r}$, m ³ /h				4,4

6 Model cieplny do symulacji wydajności budynku

Jednym z celów badań była ocena warunków cieplnych i zużycia energii w budynku na podstawie symulacji numerycznych wydajności budynku BPS. Modele numeryczne przygotowano w programach EnergyPlus 9.4 [4] i CONTAM 3.4.0.1 [169].

6.1 Charakterystyka programu EnergyPlus

EnergyPlus (EP) [4] jest to oprogramowanie ogólnodostępne i darmowe służące do przeprowadzania symulacji energetycznych budynków, obejmujących m.in. modelowanie chwilowego zapotrzebowania energii na cele ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, oświetlenia oraz powiązanych z nimi różnych systemów HVAC. Program EP został opracowany przez Departament Energii Stanów Zjednoczonych (ang. United States Department of Energy (DOE)), składa się z modułowego, ustrukturyzowanego kodu opartego na programach BLAST i DOE-2; składa się z wielu modułów współpracujących ze sobą w celu odwzorowania w jak najlepszym stopniu warunków rzeczywistych panujących w budynku. Rdzeniem symulacji jest model budynku oparty na podstawowych zasadach bilansu cieplnego. Oprogramowanie może modelować precyzyjnie konwekcyjne i radiacyjne strumienie ciepła między pomieszczeniami wewnętrznymi i środowiskiem zewnętrznym, wydajność systemów HVAC, wymianę ciepła z gruntem, komfort cieplny ludzi czy przepływy powietrza. Symulacje są wykonywane w sposób dynamiczny z nawet 1 minutowym krokiem czasowym [170]. Dane wejściowe (input) do symulacji są wprowadzane w postaci pliku tekstowego w formacie „.idf”, a wyjściowe są otrzymywane w postaci plików tekstowych oddzielonych przecinkami w formacie „.csv”. Dane klimatyczne są importowane do programu w specjalnym pliku tekstowym „.epw” (ang. EnergyPlusWeather) zawierającym godzinowe dane pogodowe (m.in. temperatura i wilgotność powietrza, prędkość i kierunek wiatru, promieniowanie słoneczne) [171]. Modułowa struktura oprogramowania daje możliwość łączenia go z innymi środowiskami obliczeniowymi, takimi jak Python [172], Matlab [173] czy CONTAM [169], w celu przeprowadzenia bardziej zaawansowanych symulacji. Ze względu na to, że EP nie posiada przyjaznego interfejsu graficznego, zazwyczaj geometria modelu jest przygotowywana w programie graficznym SketchUp [174] przy pomocy zewnętrznych dodatków w postaci oprogramowania takiego jak Euclid [31] lub OpenStudio [175], które umożliwia transkrypcję przestrzennego modelu do formy pliku tekstowego używanego przez EnergyPlus.

W odróżnieniu od programów, opierających swoje działanie na tradycyjnej metodzie bilansowej, EnergyPlus przeprowadza obliczenia w sposób dynamiczny, uwzględniając chwilowe warunki panujące w budynku, tj. nieustalony przepływ ciepła, jego akumulację w elementach konstrukcyjnych budynku, chwilowe promieniowanie słoneczne, zmienne zyski ciepła od ludzi i urządzeń czy zmienny strumień powietrza wentylacyjnego.

6.2 Charakterystyka programu CONTAM

Program CONTAM [169], został opracowany przez Narodowy Instytut Standardów i Technologii (ang. National Institute of Standards and Technology (NIST)) na początku

lat 90, służy do analizy jakości powietrza wewnętrznego oraz ogólnej oceny efektywności naturalnej i mechanicznej wentylacji w całym budynku. Umożliwia analizę: przepływów powietrza, stężenia zanieczyszczeń, zjawisk konwekcyjno-dyfuzyjnych modelowanych metodą CFD oraz systemów oddymiających [176]. Symulacje przepływów powietrza obejmują infiltrację, eksfiltrację, wielostrefowy przepływ powietrza w całym budynku odbywający się w sposób naturalny w wyniku różnicy ciśnienia na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni budynku spowodowanej przez siłę naporu wiatru i wypór termiczny oraz wymuszoną systemami wentylacji mechanicznej, co umożliwia pełną ocenę efektywności wentylacji budynku przy różnych warunkach pracy. Analiza stężenia zanieczyszczeń obejmuje symulacje migracji zanieczyszczeń spowodowanej przepływem powietrza między strefami, przekształconej przez procesy chemicznej i radiochemicznej transformacji, filtracji, adsorpcji, desorpcji w materiałach budowlanych. Może być wykorzystana do określenia jakości powietrza wewnętrznego przed ich wybudowaniem i zamieszkaniem tak, aby umożliwić zweryfikowanie projektowanych systemów wentylacyjnych i dobranych materiałów budowlanych pod kątem ich wpływu na stężenia zanieczyszczeń [169, 177].

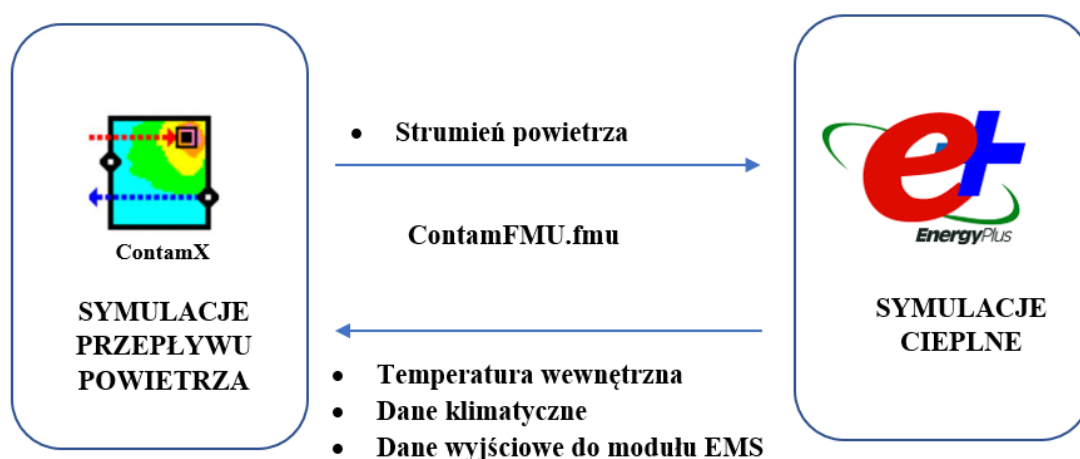
Program składa się z modułów: graficznego modułu użytkownika ContamW i silnika symulacji ContamX. ContamW jest wykorzystywany do tworzenia i przeglądania analizowanych modeli 2D.

6.3 Kosymulacja

Kosymulacja (ang. Cosimulation) to zaawansowana technika umożliwiająca symulację poszczególnych modeli składowych opisanych za pomocą równań różniczkowych, algebraicznych lub dyskretnych przez różne programy symulacyjne działające jednocześnie i wymieniające ze sobą dane, które zależą od zmiennych stanów w czasie wykonywania [178]. W pracy przeprowadzono kosymulację pomiędzy programami EnergyPlus i CONTAM w celu uzyskania jak najbardziej zbliżonych warunków do rzeczywistości, zarówno pod względem środowiska cieplnego, jak i wymiany powietrza w budynku. Program CONTAM umożliwia ocenę m.in. wymiany i jakości powietrza w budynku. Nie uwzględnia jednak zmienności temperatury powietrza w pomieszczeniach, przypisując stałą wartość podczas trwania symulacji. Natomiast program EnergyPlus umożliwia przeprowadzenie symulacji energetycznych budynku, w tym modelowanie chwilowego zapotrzebowania na energię na cele ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, oświetlenia i powiązanych systemów. Do symulacji wielostrefowych przepływów powietrza, napędzanych wiatrem i wymuszonym obiegiem powietrza przez system HVAC, jest wykorzystywany specjalny model AFN. Bazuje on na stosowanym wcześniej programie AIRNET (Walton 1989) [4, 179], który współpracuje z solverem programu CONTAM (ContamX). Z powodu ograniczeń modelu AFN, tj. nieuwzględniania przepływów powietrza przez kominy wentylacji grawitacyjnej czy większej liczby miejsc nieszczelności powietrza niż przyporządkowanych tylko powierzchniom wymiany ciepła (temat jest szerzej opisany w pracy Dols i in. [180]), same symulacje w programie EnergyPlus są niewystarczające. Dlatego przeprowadzenie kosymulacji daje większe możliwości odwzorowania warunków rzeczywistych. Należy również podkreślić, że takie

łączenie programów wymaga szczególnej uwagi i dokładności podczas budowania modeli. Proces dynamicznej wymiany informacji również wydłuża czas symulacji.

Przeprowadzenie połączonej kosymulacji przepływu powietrza i wymiany ciepła jest możliwe dzięki zastosowaniu specjalnego standardu FMI (ang. Functional Mock-Up Interface) do wymiany informacji między modelami dynamicznymi [181]. W trakcie początkowej kosymulacji uzyskane dane wymiany ciepła są transformowane/przekształcane (w tym temperatura stref, dane klimatyczne, dane wyjściowe modułu EMS) z programu EnergyPlus do programu CONTAM. W oparciu o te dane wejściowe i model wentylacji naturalnej w programie CONTAM solver programu (ContamX) wykonuje obliczenia przepływu powietrza. Dane wyjściowe z programu CONTAM (współczynniki infiltracji strefy, przepływ powietrza między strefami) są wysyłane do programu EnergyPlus. W kolejnym kroku czasowym czynności się powtarzają. Do połączenia obydwu programów potrzebny jest plik w formacie „idf” zawierający dane z programu CONTAM. Do jego przygotowania służy program Contam3DExport opracowany przez NIST [169], w którym plik z programu CONTAM „prj” jest konwertowany do formatu obsługiwanego przez EnergyPlus „idf”. Schemat prowadzonych obliczeń został pokazany na Rys. 6.1.

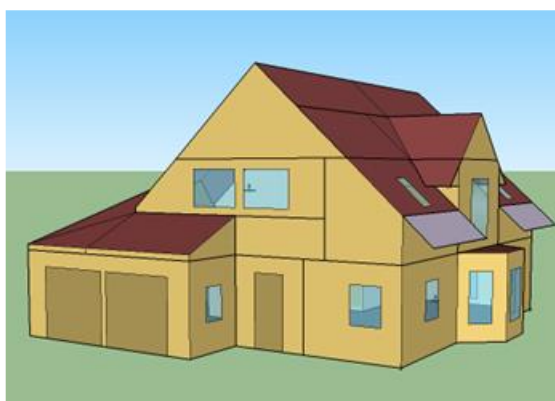


Rys. 6.1. Schemat połączenia programów EnergyPlus i CONTAM

6.4 Wielostrefowy model budynku jednorodzinnego

6.4.1 Model cieplny

Geometria wielostrefowego modelu domu jednorodzinnego (Rys. 6.2) została przygotowana w programie graficznym SketchUp [174] obsługującym wtyczkę do programu OpenStudio [175], umożliwiającą transkrypcję przestrzennego modelu do formatu pliku tekstowego „.idf” używanego przez program EP [4]. Poza geometrią modelu plik tekstowy zawiera podstawowe dane wejściowe i założenia potrzebne do symulacji w EP. Przegrody budowlane przygotowano zgodnie z danymi producentów materiałów budowlanych (Tab. 5.1) i pozostawiono je takie same dla wszystkich symulacji.



Rys. 6.2. Model budynku w programie SketchUp

Wartości zysków wewnętrznych ciepła założono zgodnie ze standardem ASHRAE [182]. Wprowadzono jeden profil zysków ciepła od poniedziałku do piątku i drugi w weekendy. Harmonogram przebywania ludzi został przygotowany w oparciu o informacje pozyskane od mieszkańców. W trakcie badań w budynku mieszkały dwie osoby dorosłe. Założono, że całkowity strumień ciepła (ciepło jawne i utajone) od ludzi wynosił 126 W na osobę. Zyski chwilowe ciepła od urządzeń wyniosły w salonie: kuchenka gazowa 300 W, lodówka 150 W, telewizor 175 W, w gabinecie: komputer 100 W, pokoju 1: żelazko 100 W. W łazienkach wprowadzono zyski od parującej ciepłej wody (968 W) w trakcie kąpieli. Do sterowania włączaniem oświetlenia (2 W/m^2) wybrano funkcję ‘DaylightingControl’, która uruchamia źródła światła w zależności od natężenia oświetlenia pomieszczeniu. Założono, że oświetlenie sztuczne było włączane, jeśli natężenie oświetlenia naturalnego spadło poniżej 300 lx oraz tylko w pomieszczeniach, w których przebywali mieszkańcy w tym czasie, za wyjątkiem godzin snu. Rolety wewnętrzne (na parterze i poddaszu w tradycyjnych oknach – rzymskie/przepuszczające światło słoneczne, a na poddaszu w oknach dachowych oraz w garażu - zaciemniające) były zasłonięte, gdy natężenie promieniowania słonecznego padającego prostopadłe do okna było powyżej 50 W/m^2 lub gdy temperatura zewnętrzna przekraczała 24°C . Założono, że w garderobach oraz w garażu okna były stale zasłonięte. Dane optyczne rolet (tj. światło widzialne, promieniowanie słoneczne) założono zgodnie z danymi producenta [183], a wartość współczynnika przewodzenia ciepła przyjęto na podstawie pracy Zhanga i Wanga [184].

6.4.2 Ogrzewanie

Do sterowania ogrzewaniem wybrano dwa systemy:

- ‘IdealLoadsAirSystem’ (dalej nazywanym „system idealnym”), zapewniający uzyskanie zadanych wartości temperatury w pomieszczeniach bez uwzględnienia ponoszonych strat przez system, czyli działający ze 100% efektywnością – wykorzystany w trakcie walidacji modelu i studium przypadku;
- ‘Plant Heating Loop’ (dalej nazywanym „system rzeczywistym”) – odwzorowujący rzeczywiste działanie systemu centralnego ogrzewania z uwzględnieniem strat ponoszonych przez system – wykorzystany w studium przypadku.

System rzeczywisty w odróżnieniu od systemu idealnego umożliwia obliczenie zużycia energii wykorzystywanej na potrzeby ogrzewania budynku, co pozwoliło na przeprowadzenie obliczeń emisji dwutlenku węgla do środowiska w oparciu o bezpośrednie wyniki z symulacji.

System rzeczywisty składał się z pętli instalacji utworzonej przy użyciu obiektu EP ‘PlantLoop’, stanowiącej połączenie pomiędzy elementami instalacji. Pętla dzieli się na stronę zasilania i odbioru (Rys. 6.3). W skład pętli wchodzi źródło ciepła (np. kocioł), pompa obiegowa, system rurowy z obejściem by-pass oraz grzejniki centralnego ogrzewania. Przy tworzeniu pętli przyjęto następujące założenia:

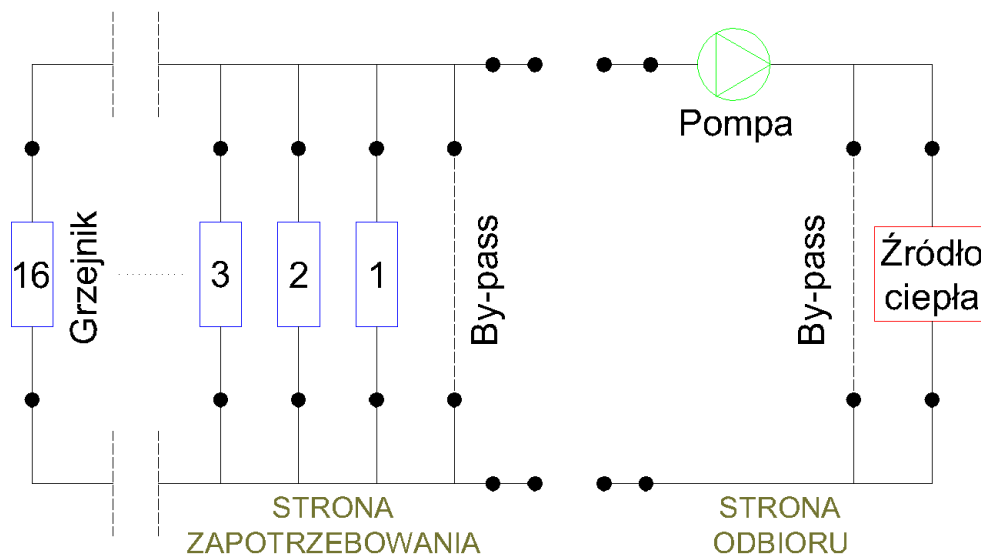
- Do zamodelowania grzejników zasilanych wodą wykorzystano model „ZoneHVAC:Baseboard:RadiantConvective:Water” uwzględniający przenoszenie ciepła na drodze konwekcji i promieniowania. Moc oraz liczba grzejników w danej strefie została założona na podstawie dokumentacji projektowej budynku (Tab. 6.1);
- Zbudowano uproszczony system rurowy, który w przypadku programu EP jest używany jako element łączący, przekazujący parametrów czynnika grzewczego z wlotu do wylotu. Nie uwzględnia on rzeczywistego przebiegu rur (np. zmian kierunku, średnicy) i strat hydraulicznych. Na potrzeby obliczeń cieplnych takie modelowanie jest wystarczające i jedynie możliwe do wykonania w EP [5];
- Efektywność pracy pompy obiegowej o zmiennej prędkości obrotowej wynosiła 90% (zgodnie z literaturą [185]), a ciśnienie nominalne 20 kPa;
- Czynnik grzewczy to woda o temperaturze zasilania 70°C i powrotu 55°C;
- Nastawę temperatury odpowiadającej za pracę zaworów termostatycznych ustawiono przy użyciu funkcji ‘ThermostatSetpoint:SingleHeating’, która uwzględnia jedynie system ogrzewania, nie steruje systemem chłodzenia;
- Przyjęto 5 rodzajów źródła ciepła: kocioł gazowy kondensacyjny, kocioł węglowy, kocioł na biomasę, kocioł elektryczny oraz pompa ciepła typu powietrze/woda. W przypadku kotła węglowego i na biomasę zastosowano zbiornik buforowy zabezpieczający instalację przed przegrzaniem. Nominalną moc cieplną kotłów 15 kW dobrano zgodnie z projektowanym obciążeniem cieplnym budynku podanym w dokumentacji projektowej;

- Nominalne sprawności cieplne kotła i zbiornika buforowego przyjęto zgodnie z danymi w rozporządzeniu [1] odpowiadającymi sprawnościom:
 - wytwarzania ciepła z nośnika energii lub energii dostarczanych do źródła ciepła: dla gazu 91%, dla węgla 82%, biomasy 70%, energii elektrycznej 95% (wytworzonej w elektrowni węglowej), pompy ciepła napędzanej elektrycznie 260%;
 - akumulacji ciepła w elementach pojemnościowych (zbiorniku buforowym): dla biomasy i węgla: 95%;
- Ze względu na wymagania obliczeniowe programu EP po każdej stronie pętli zamodelowano obejście by-pass.

W trakcie walidacji modelu nastawy temperatury w pomieszczeniach w okresie grzewczym zadano zgodnie ze stanem rzeczywistym (pomiarami).

Tab. 6.1. Zestawienie grzejników

Nr grzejnika	Strefa	Moc cieplna, W
1	Wiatrołap	450
2	Salon	1000
3	Salon	450
4	Salon	450
5	Salon	1400
6	Gabinet	800
7	Łazienka 1	300
8	Kotłownia	500
9	Garaż	1800
10	Garaż	1800
11	Sypialnia	1200
12	Garderoba 2	300
13	Pokój 1	1200
14	Garderoba 1	300
15	Pokój 2	800
16	Łazienka 2	700



Rys. 6.3. Schemat pętli instalacji centralnego ogrzewania zamodelowanej w programie EnergyPlus (z zaznaczonymi węzłami pętli)

6.4.3 Wentylacja

Wielostrefowy model budynku do oceny wentylacji naturalnej grawitacyjnej składający się z poziomów: parteru, poddasza i dachu został przygotowany w module ContamW (Rys. 6.4). Wielkość oraz liczbę otworów wywiewnych wprowadzono zgodnie ze stanem rzeczywistym: w salonie 3 okrągłe otwory o średnicy 140 mm, w obu łazienkach jeden kwadratowy wywiewnik o wymiarach 14×14 mm, w garażu 2 okrągłe wywiewniki o średnicy 150 mm oraz w kotłowni kwadratowy wywiewnik o wymiarach 14×14 mm. W drzwiach do łazienek oraz do kotłowni uwzględniono otwory wentylacyjne. Przyjęto, że murowane kominy grawitacyjne mają chropowatość 3,0 mm, a suma współczynników strat miejscowych wynosi $\xi=3,0$. Wysokość kominów wentylacyjnych ponad dach (ok. 1 m) wprowadzono zgodnie ze stanem faktycznym. Powietrze z kotłowni i garażu było bezpośrednio wyprowadzone okrągłymi kanałami wentylacyjnymi o średnicach odpowiednio 140 mm i 90 mm na zewnątrz budynku. Do obliczeń przepływu powietrza przez zamknięte okna i drzwi wybrano jednokierunkowy model „POWERLAW” opisany równaniami (2) i (3). Dla przepływu powietrza przez otwarte bądź uchylone okna i drzwi zastosowano model z dwukierunkowym przepływem powietrza „Single Opening”. Powierzchnię otwartą okna obliczono zgodnie z wytycznymi podanymi w pracy Pinto i in. [186]. Ze względu na ograniczone możliwości w programie CONTAM obliczoną powierzchnię okna wprowadzono do programu jako dwa prostokąty w celu zamodelowania przepływu dwukierunkowego. Do zamodelowania przepływu pomiędzy parterem a poddaszem połączonych wewnętrznymi schodami (strefa: Hol) wykorzystano model „Stairwells” bazujący na danych eksperymentalnych z pracy Achakji i Tamura [187].

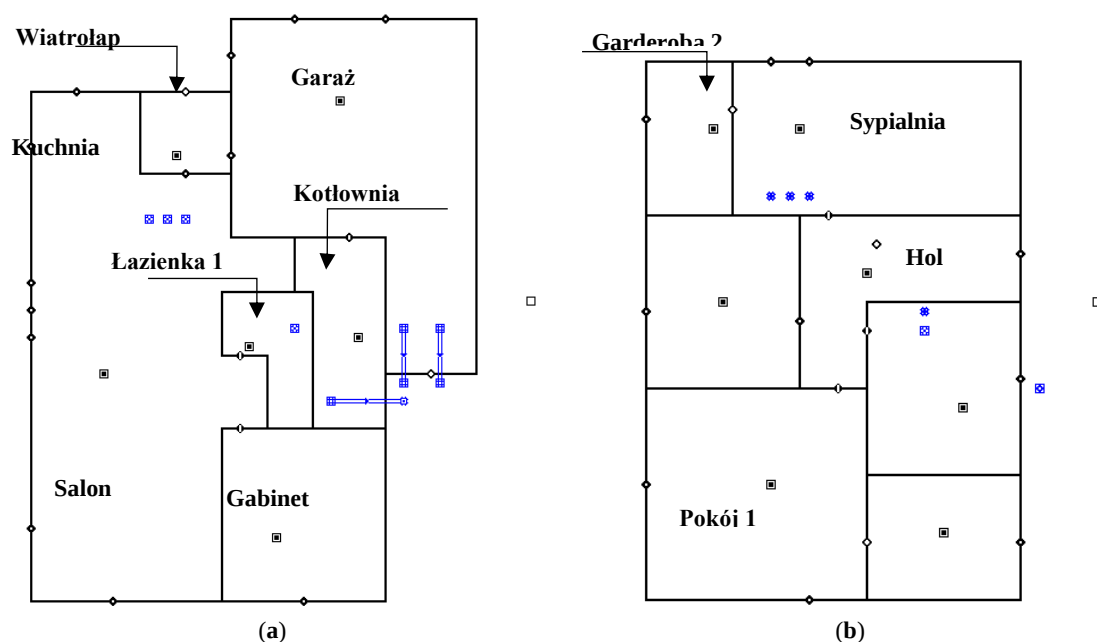
$$\dot{V} = C \cdot (\Delta p)^n \quad (2)$$

$$C = a \cdot l \quad (3)$$

gdzie: $\dot{V}$ – strumień objętości powietrza, $\frac{m^3}{h}$, C – empiryczny współczynnik przepływu, $\frac{m^3}{h \cdot Pa^n}$, n – wykładnik charakterystyki potęgowej, przyjmuje wartość $n=0,67$ dla okien i drzwi zewnętrznych oraz $n=0,5$ dla drzwi wewnętrznych [188], Δp – różnica ciśnienia, Pa, a – współczynnik szczelności; $\frac{m^3}{m \cdot h \cdot Pa^n}$, l – długość szczelin, m.

Wstępną wartość współczynnika szczelności okien przyjęto na podstawie dostępnych badań przeprowadzonych dla polskich budynków mieszkalnych [189, 190]. Została ona zweryfikowana i potwierdzona w trakcie kalibracji modelu. Dla okien przyjęto $a=0,25 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}^n)$, a dla drzwi wewnętrznych $a=3,50 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}^n)$ i zewnętrznych $a=0,30 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}^n)$. Założono (na podstawie informacji od mieszkańców), że drzwi wewnętrzne, poza drzwiami do pokoju 2, garażu i wiatrołapu będą otwarte cały czas.

Model przygotowany w programie CONTAM nie uwzględniał nieogrzewanego strychu oraz nieogrzewanej przestrzeni nad garażem. Dlatego do obliczeń cieplnych w programie EnergyPlus wprowadzono w tych strefach model infiltracji powietrza oparty na metodzie „Infiltration by Effective Leakage Area” (ELA). Efektywną powierzchnię wycieku założono zgodnie z wytycznymi ASHRAE [182].



Rys. 6.4. Widoki kondygnacji budynku przygotowanych w ContamW: (a) parteru, (b) poddasza. System wentylacji zaznaczono niebieskim kolorem

6.4.4 Chłodzenie

Chłodzenie mechaniczne

Modelowanie chłodzenia mechanicznego w EP było realizowane na dwa sposoby: przy użyciu systemu 'IdealLoadsAirSystem' oraz jednostek klimatyzacyjnych projektowanych komponentem 'ZoneHVAC:WindowAirConditioner' odwzorowujących pracę klimatyzatorów typu Split. Pierwszy sposób został wykorzystany do obliczeń teoretycznych, które nie występują w rzeczywistych warunkach. Drugi sposób miał na celu odwzorowanie rzeczywistego systemu chłodzenia mechanicznego budynków jednorodzinnych z uwzględnieniem strat i rzeczywistej pracy jednostek.

W przypadku systemu 'IdealLoadsAirSystem' temperaturę chłodzenia zadano z wykorzystaniem termostatu 'HVACTemplate:Thermostat', a klimatyzatorów 'ThermostatSetpoint:DualSetpoint'.

Do modelowania chłodzenia mechanicznego za pomocą klimatyzatorów przyjęto następujące założenia:

- Jednostki klimatyzacyjne znajdowały się w pomieszczeniach przebywania ludzi: w salonie, gabinecie, sypialni, pokoju 1 i 2;
- Jednostki klimatyzacyjne składały się z chłodnicy z bezpośrednim odparowaniem (pompy ciepła), wentylatora i zewnętrznego mieszacza powietrza;
- Średnią sezonową sprawność całkowitą systemu chłodzenia wyznaczono zgodnie z rozporządzeniem [1];
- Wartość średniego sezonowego współczynnika efektywności energetycznej dla trybu chłodzenia (SEER) przyjęto 7, bazując na dokumentacji technicznej producenta [191], co odpowiada klasie efektywności energetycznej klimatyzatora A++ zgodnie z Rozporządzeniem Delegowanym Komisji (UE) [192];
- Moc chłodniczą jednostek określono na podstawie obliczeń projektowych (Tab. 6.2).

Tab. 6.2. Moc chłodnicza jednostek klimatyzacyjnych

Strefa	Moc chłodnicza, W
Salon	8000
Gabinet	2500
Sypialnia	4000
Pokój 1	3000
Pokój 2	2500

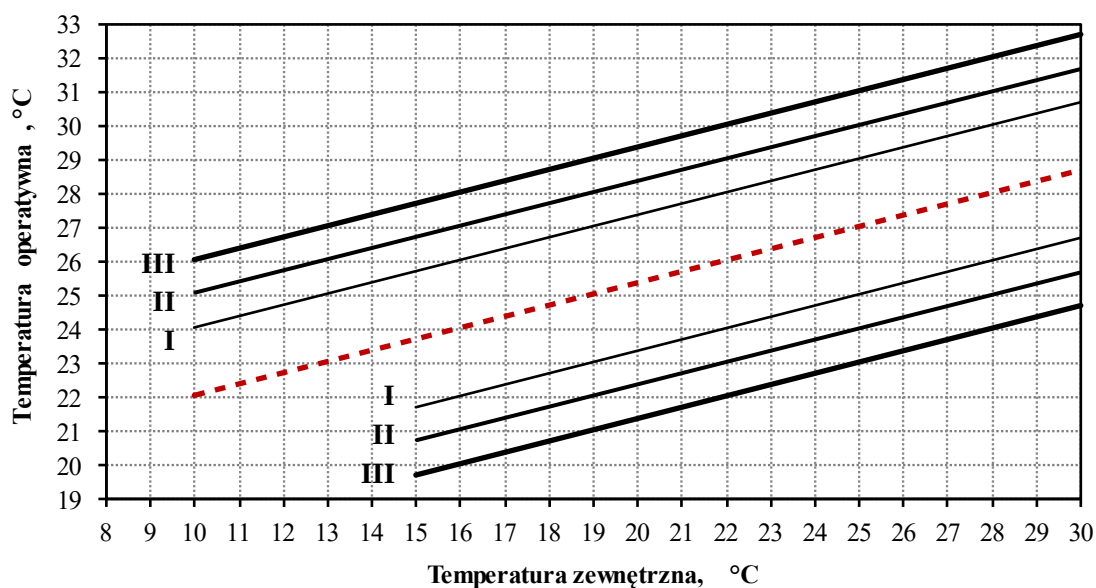
Chłodzenie pasywne – sterowanie otwieraniem okien

Do sterowania otwieraniem okien w trakcie kosymulacji wykorzystano moduł EMS (ang. Energy Management System) programu EP. Pozwala on uzyskać dostęp do szerokiej gamy danych „z czujników”, w tym elementów kontrolnych w programie CONTAM [5]. Dla

każdego okna w programie CONTAM zadano element kontrolny typu „Constant”, którego zmiana wartości od 0 do 1 steruje wielkością otwarcia okna. Sama wartość jest zadawana na podstawie warunków ustalonych w module EMS przy użyciu sterownika przygotowanego na zasadzie „IF... THEN”. Założenia do sterowania otwieraniem okien opisano w rozdz. 8.1.1.

6.4.5 Model komfortu cieplnego

Do oceny warunków środowiska cieplnego przy wykorzystaniu pasywnego chłodzenia przyjęto model adaptacyjny opisany w normie PN-EN 16798-1:2019 [47] i standardzie ASHRAE 55 [193], który jest stosowany do budynków biurowych i mieszkalnych z wentylacją naturalną [194]. Jak pokazały badania [195, 196], model Fangera PMV-PPD nie sprawdza się zbyt dobrze dla tego typu budynków ze względu na mniej krytyczną ocenę warunków środowiska wewnętrznego przez ludzi niż otrzymaną na podstawie pomiarów odczuć cieplnych. Model adaptacyjny zakłada, że ludzie mogą dostosować się do zmieniających warunków środowiska cieplnego przez tzw. „zachowania adaptacyjne”, tj. dostosowanie odzieży, otwieranie i zamykanie okien w celu wpływania na intensywność ruchu powietrza, korzystanie z przenośnych wentylatorów i urządzeń grzewczych, zasłon, żaluzji, rolet okiennych w nasłonecznionych częściach budynku. Opiera się na założeniu, że klimat zewnętrzny (głównie temperatura powietrza) ma bezpośredni wpływ na zakres dopuszczalny temperatury operatywnej powietrza zapewniający warunki komfortu cieplnego. Model definiuje trzy kategorie środowiska wewnętrznego: I (akceptowalność 90%), II (akceptowalność 80%) i III (akceptowalność 65%), które są wyznaczane w oparciu o wewnętrzną temperaturę operatywną jako funkcję ważonej średniej kroczącej (ruchomej) średnich wartości temperatury zewnętrznej dziennej z tygodnia poprzedzającego dany dzień wg normy PN-EN 16798-1:2019 [47] lub średnich wartości miesięcznych temperatury zewnętrznej wg ASHRAE 55 [193]. Zależność została pokazana na Rys. 6.5, gdzie linia kolorem czerwonym oznacza optymalną temperaturę operatywną środowiska wewnętrznego (zwaną później w pracy optymalną temperaturą komfortu) przy określonej temperaturze powietrza zewnętrznego [3, 197-199]. W badaniach wartość temperatury operatywnej została obliczona w trakcie symulacji energetycznych budynku. Do oceny warunków komfortu cieplnego wybrano zakres II kategorii środowiska cieplnego, który powinien być spełniony dla nowo wybudowanych budynków.



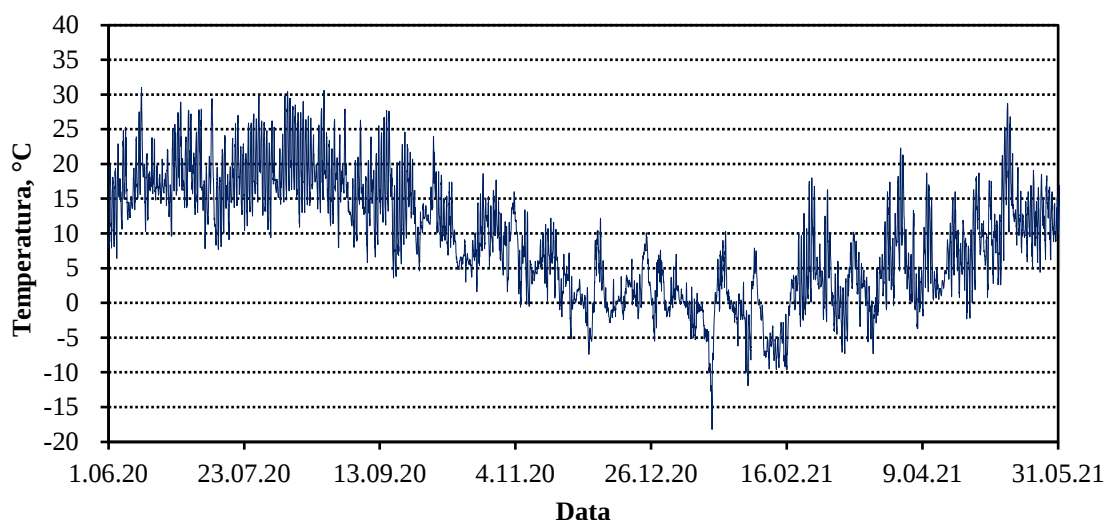
Rys. 6.5. Klasyfikacja środowiska cieplnego w budynkach z wentylacją naturalną (z znaczoną optymalną temperaturą komfortu cieplnego wg modelu adaptacyjnego) [193]

Dodatkowo wybór modelu adaptacyjnego do badań symulacyjnych wynika z faktu, że symulacje energetyczne budynku skali makro (BPS) nie uwzględnia zmiany prędkości powietrza w pomieszczeniu na skutek otwarcia okna. Model cieplny wprowadzić pozwala określić wskaźniki PMV i PPD, jednak przy założonej stałej prędkości powietrza (na poziomie 0,2 m/s). W tej pracy wpływ zmiany prędkości powietrza na odczucia cieplne określono w dodatkowych badaniach CFD. Co więcej model ten jest stosowany z powodzeniem w wielu publikacjach naukowych o podobnej tematyce [45].

6.4.6 Klimat zewnętrzny

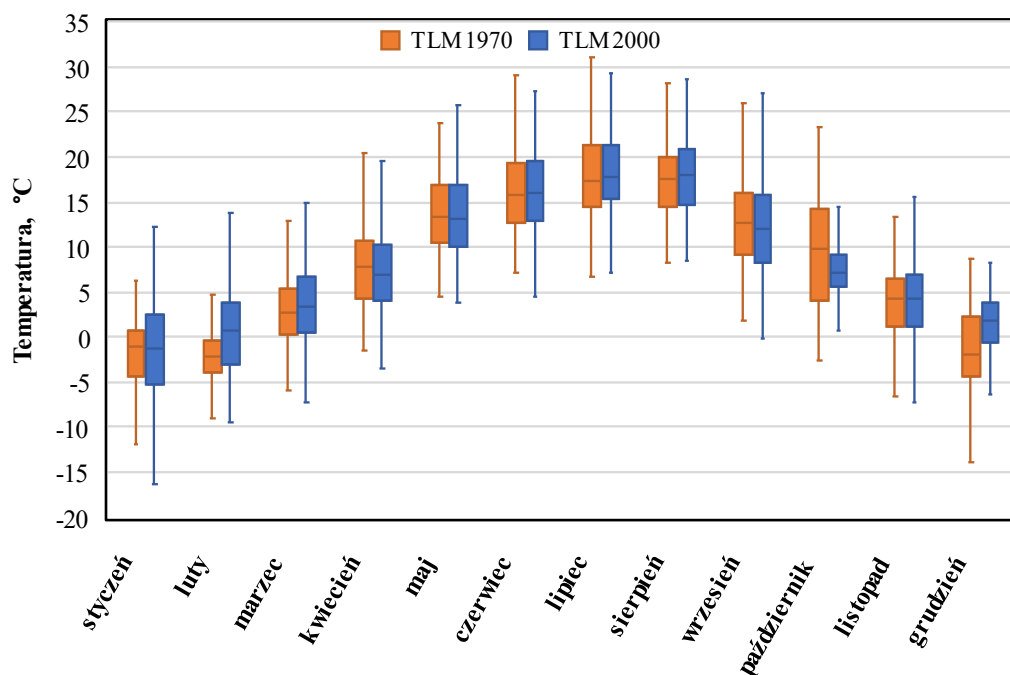
Klimat obecny

Symulacje wykonane w ramach walidacji modelu przeprowadzono dla rzeczywistych historycznych danych pogodowych ze stacji meteorologicznej Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej IMGW (Rys. 6.6) Wykorzystano dane klimatyczne z najbliższej stacji Katowice położonej w odległości 15 km od badanego obiektu [200]. Wartości promieniowania słonecznego pochodziły z satelity z CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service), wykorzystano model satelitarny Heliostat-4 [201, 202]. W związku z kampanią pomiarową trwającą od 1 czerwca 2020 r. do 31 maja 2021 r. wykorzystano dane pogodowe z lat 2020–2021. Do kosymulacji przygotowano dane w formacie EPW (EnergyPlus Weather File).



Rys. 6.6. Przebieg temperatury powietrza zewnętrznego (z danych meteo IMGW – stacja Katowice)

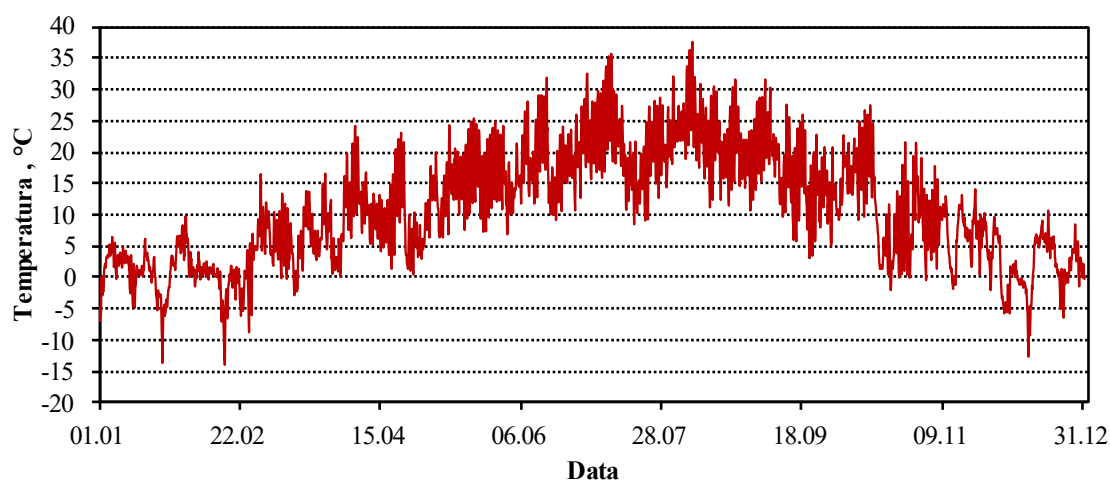
Symulacje w ramach studium przypadku przeprowadzono dla typowych lat meteorologicznych dla Katowic opracowanych na podstawie danych meteorologicznych i klimatycznych ze stacji synoptycznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) [203] z lat 2001–2020 (TLM2000) oraz modeli powtórnej analizy wstecznej bazy danych ERA5 systemu Copernicus [204]. Są to nowe dane klimatyczne, wcześniejsze dane klimatyczne standardowe były opracowane przez Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju do wykorzystania w obliczeniach budynków [205] na podstawie danych z 1971–2000 (TLM1970) Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) [203]. W przypadku TLM1970 dane źródłowe opracowano na podstawie trzygodzinnych danych synoptycznych IMGW dla 10 parametrów meteorologicznych oraz wartości natężenia promieniowania słonecznego modelowanych za pomocą nieopisanego modelu matematycznego. Ich wiarygodność była podważana głównie ze względu na niewystępowanie w nich wartości temperatury powietrza zewnętrznego zbliżonej do wartości obliczeniowej oraz bardzo nietypowe wartości i rozkłady natężenia promieniowania słonecznego [204]. Dodatkowo są to dane przestarzałe: jak pokazały badania Narowskiego [206], różnice w zapotrzebowaniu na ciepło/chłód obliczone na podstawie danych TLM1970 i TLM2000 mogą być znaczne, w przypadku Warszawy zapotrzebowanie na energię użyteczną ogrzewania zmalało o 12%, a chłodzenia wzrosło o 26%. Dlatego w pracy zdecydowano się na wykorzystanie najnowszych danych TLM2000. Rys. 6.7 obrazuje porównanie historycznych danych pogodowych z lat 1971–2000 (TLM1970) oraz 2001–2000 (TLM200).



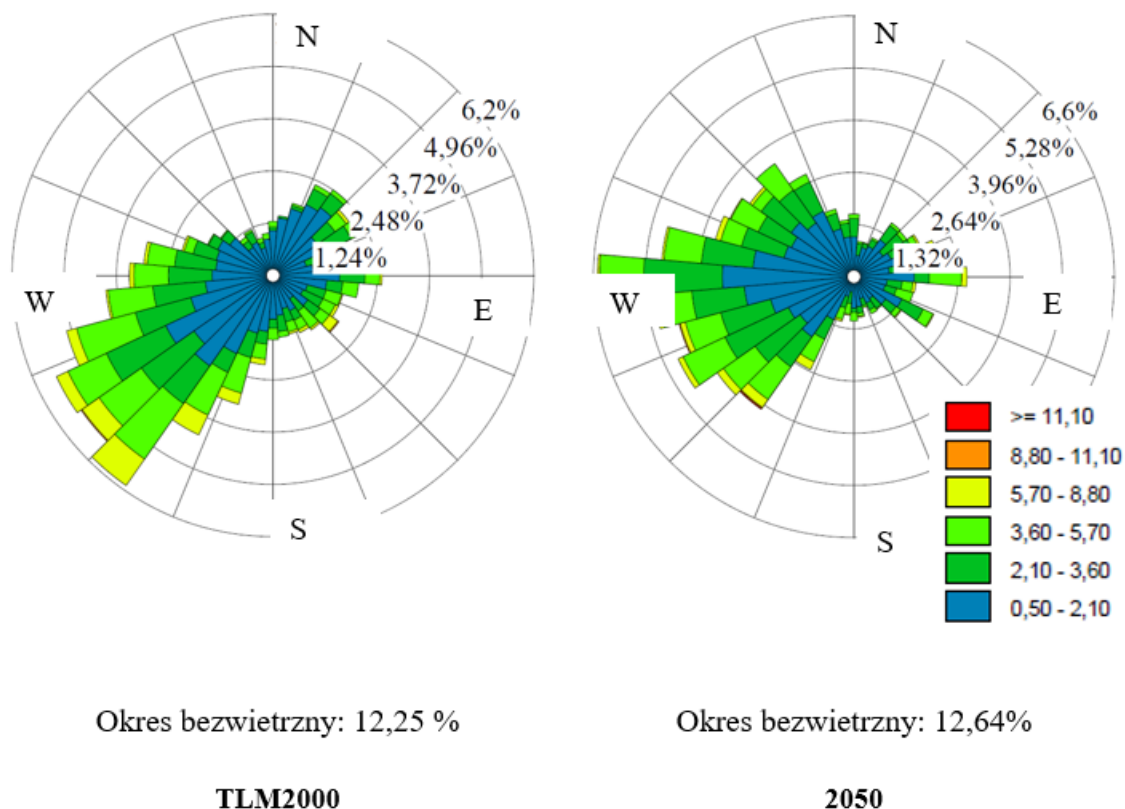
Rys. 6.7. Średnia, minimalna i maksymalna miesięczna temperatura powietrza zewnętrznego – porównanie TLM1970 i TLM2000

Klimat przyszły (prognozowany)

Do analizy efektywności systemów w ocieplającym się klimacie przygotowano prognozowany klimat na 2050 rok (Rys. 6.8). Dane do stworzenia klimatu zostały przygotowane na podstawie klimatu TLM1970 ze względu na brak scenariuszy prognozowania dla klimatu TLM2000 na moment prowadzenia badań. Wykonano zgodnie z dokumentem SRES (ang. Special Report on Emissions Scenarios) [113], opublikowanym przez IPCC [6]. Wybrano najbardziej niekorzystny scenariusz (A2) pod względem prognozowanej emisji CO₂. Na Rys. 6.9 przedstawiono różę wiatrów sporządzoną wg danych klimatycznych TLM2000 i 2050 dla okresów chłodzenia pasywnego.



Rys. 6.8. Prognozowany przebieg zmienności temperatury powietrza zewnętrznego na 2050 rok



Rys. 6.9. Róża wiatrów w okresie chłodzenia pasywnego dla klimatów TLM2000 i 2050

6.5 Walidacja eksperymentalna i dostrajanie modelu cieplnego

W celu weryfikacji modelu numerycznego przeprowadzono walidację wyników symulacji obejmującą porównanie wyników pomiarów temperatury w sześciu pomieszczeniach (salon, gabinet, sypialnia, łazienka 2 oraz pokój 1 i 2) dla całego okresu pomiarowego oraz strumienia powietrza wentylacyjnego w pokojach 1 i 2 dla wybranych dni okresu przejściowego i zimowego. Następnie przeprowadzono ręczny proces dostrojenia modelu, a wyniki przedstawiono na Rys. 6.11. Ze względu na złożoność kalibrowanego modelu uwzględniającego zarówno międzystrefowy przepływ powietrza, jak i wymianę ciepła, dostrajanie modelu składało się z czterech etapów:

Etap 1 – walidacja i kalibracja modelu wymiany powietrza przygotowanego w programie CONTAM;

Etap 2 – model kalibracyjny do kosymulacji dla okresów bez przebywania ludzi;

Etap 3 – model kalibracyjny z mieszkańcami (wewnętrzny profil zysków ciepła i wilgoci, sterowania roletami);

Etap 4 – model kalibracyjny z uwzględnieniem otwierania okna.

Do oceny zgodności modelu symulacyjnego przygotowano przebiegi temperatury w badanych pomieszczeniach oraz zastosowano wskaźniki podane w poradniku

ASHRAE [207]. Pierwszy z nich to znormalizowany średni błąd odchylenia *NMBE* (ang. Normalized Mean Bias Error) obliczany ze wzoru (4), a drugi to współczynnik zmienności średniego błędu kwadratowego *CV(RMSE)* (ang. Coefficient of Variation of Root Mean Squared Error) obliczany ze wzoru (5). Wskaźniki są stosowane dla wartości średniogodzinowych i średniomiesięcznych. W przypadku kroku godzinowego wskaźniki *NMBE* i *CV(RMSE)* powinny być nie większe niż 10% i 30%, natomiast dla danych średniomiesięcznych wskaźniki *NMBE* i *CV(RMSE)* nie powinny przekraczać odpowiednio 5% i 15%. Przewodnik ASHRAE [207] sugeruje te błędy dla zużycia energii w budynkach, ale badacze biorą je również pod uwagę przy porównywaniu temperatury w pomieszczeniach [208-210].

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^k (M_i - S_i)}{(k - p) \cdot \overline{M}_t} \times 100 \quad (4)$$

$$CVRMSE = \frac{1}{\overline{M}_t} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (M_i - S_i)^2}{k - p'}} \times 100 \quad (5)$$

gdzie: M_i – wartość pomiarowa, S_i – wartość symulowana, k – liczba wartości porównywanych, $\overline{M}_t$ – średnia arytmetyczna wartości pomiarowych, p – liczba regulowanych parametrów modelu, której wartość dla celów kalibracji jest sugerowana jako 0 dla wskaźnika *NMBE* i 1 dla wskaźnika *CV(RMSE)* [211, 212].

Obliczono również średni błąd bezwzględny zgodnie ze wzorem (6) [213] oraz korelację (8) wyników w celu określenia wzajemnego powiązania pomiędzy zmiennymi zmierzonymi i symulowanymi. Korelację uznano za silną, jeżeli współczynnik korelacji liniowej Pearsona R był większy od 0,7 [214, 215].

$$|\overline{D}| = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |D_i| \quad (6)$$

$$D_i = |M_i - S_i|, \quad (7)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^k [(M_i - \overline{M}_t) \times (S_i - \overline{S}_t)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (M_i - \overline{M}_t)^2 \times \sum_{i=1}^k (S_i - \overline{S}_t)^2}} \quad (8)$$

gdzie: D_i – błąd bezwzględny, k – liczba wartości porównywanych, M_i – wartość pomiarowa, S_i – wartość symulowana, $\overline{M}_t$ – średnia arytmetyczna wartości pomiarowych, $\overline{S}_t$ – średnia arytmetyczna wartości symulowanych.

Końcowe wskaźniki błędów po kalibracji modelu przedstawiono w Tab. 6.3. Na podstawie tych wyników oraz uzyskanych przebiegów temperatury stwierdzono, że przygotowany

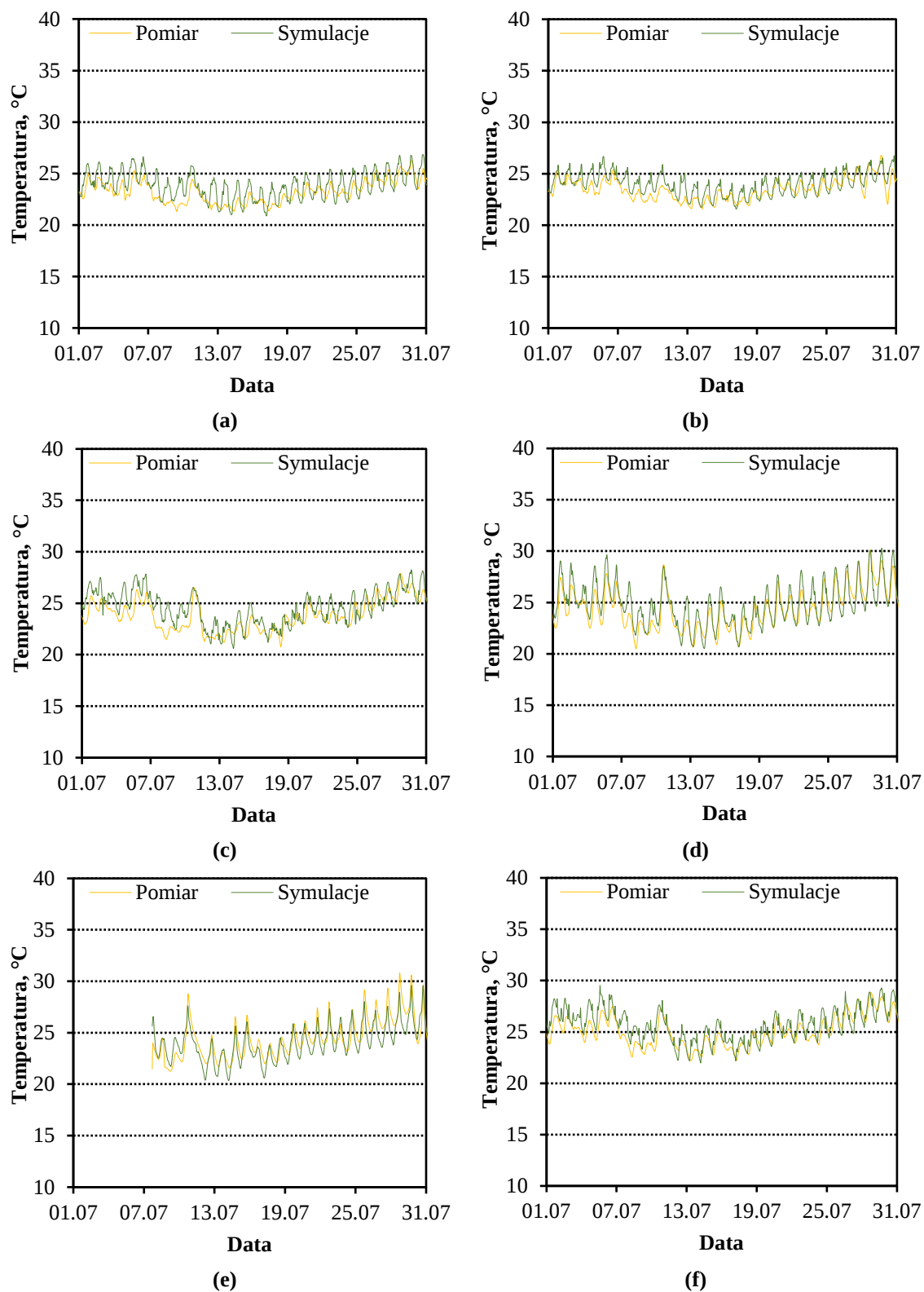
model numeryczny budynku jednorodzinnego może być wykorzystywany do symulacji energetycznych. Wartości wskaźników spełniały wymagania ASHRAE [207]. Błędy w kroku godzinowym i miesięcznym były znacznie poniżej dopuszczalnych wartości we wszystkich rozpatrywanych pomieszczeniach. Wskaźnik *NMBE* nie przekroczył 1%, a wskaźnik *CV(RMSE)* 7%. Ponadto uzyskano wysoką korelację wyników pomiędzy wartościami zmierzonymi i obliczonymi w zakresie od 0,86 do 0,90. Średni błąd bezwzględny wahał się od 0,8°C do 1,1°C dla wartości godzinowych, a w przypadku wartości miesięcznych wskaźnik $|\bar{D}|$ był niższy od 1°C. Uzyskano przebiegi zmienności temperatury powietrza zbliżone do przebiegów rzeczywistych (Rys. 6.10). Szczegółowy opis weryfikacji modelu numerycznego został omówiony przez autorkę w publikacji Sarny i in. [216].

Tab. 6.3. Wartości wskaźników *NMBE*, *CV(RMSE)*, $|\bar{D}|$, *R* dla skalibrowanego modelu

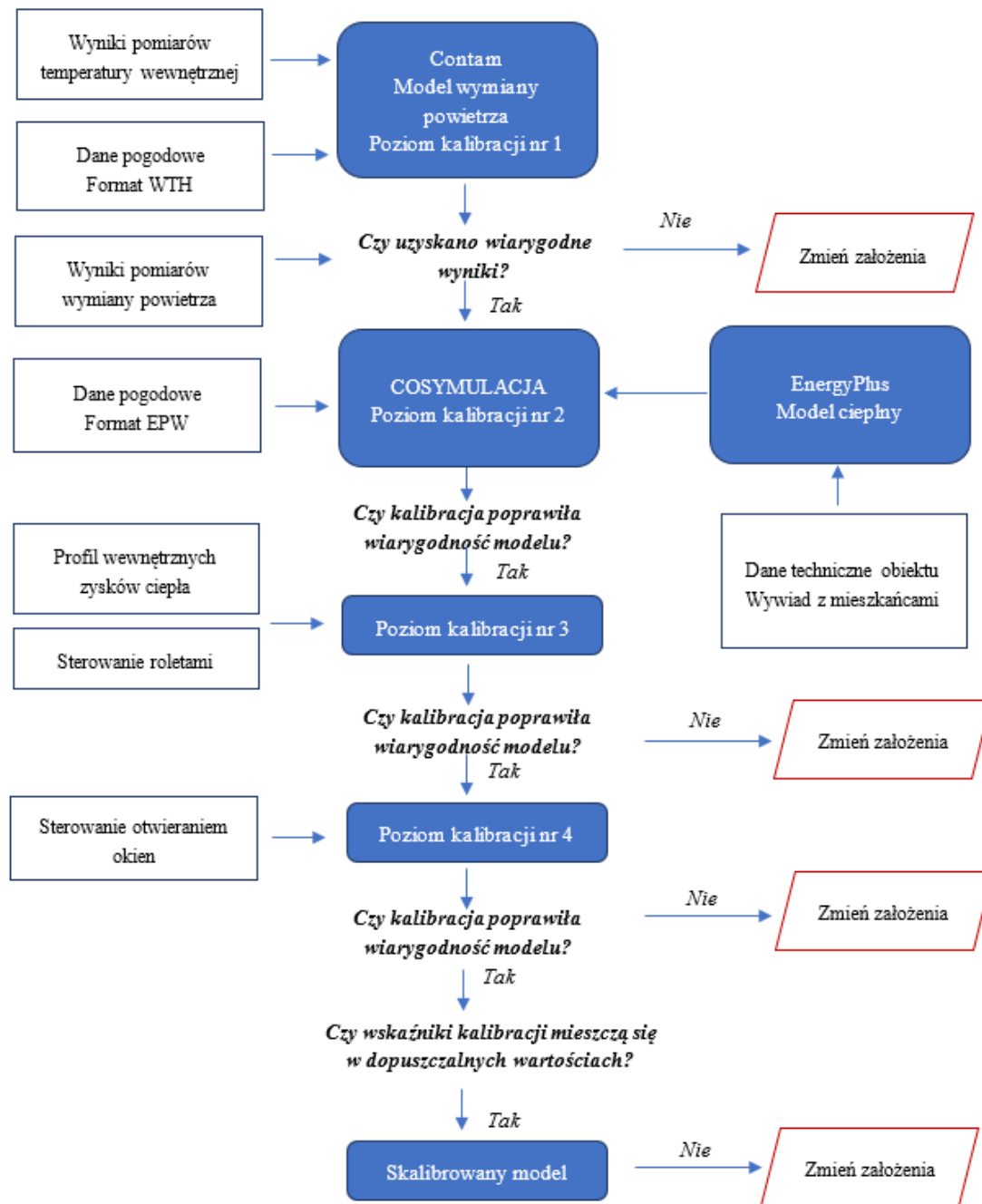
Nazwa pomieszczenia	<i>NMBE</i>	<i>CV(RMSE)</i>	$ \bar{D} $	<i>NMBE</i>	<i>CV(RMSE)</i>	$ \bar{D} $	<i>R</i>
	Wartości godzinowe			Wartości średniomiesięczne			
Salon	1%	5%	0,9°C	1%	5%	0,6°C	0,86
Gabinet*	1%	5%	0,9°C	1%	5%	0,6°C	0,89
Sypialnia	0%	5%	0,8°C	0%	5%	0,5°C	0,89
Pokój 1	1%	6%	0,9°C	1%	6%	0,6°C	0,89
Pokój 2**	0%	7%	1,1°C	0%	7%	0,7°C	0,88
Łazienka 2	1%	5%	0,8°C	1%	5%	0,6°C	0,90

*Pomiary były przeprowadzone do 1 lutego 2021 roku

**Pomiary przeprowadzono od 8 lipca 2020 roku



Rys. 6.10. Przebieg zmienności temperatury powietrza w: a) salonie, b) gabinecie, c) sypialni, d) pokoju 1, e) pokoju 2, f) łazience dla godzinowych wartości zmierzonych i obliczonych



Rys. 6.11. Schemat kalibracji modelu

7 Modelowanie numeryczne CFD przepływu powietrza (wentylacji naturalnej) w pomieszczeniu

Jednym z zadań było zbadanie wpływu pasywnego chłodzenia powietrzem zewnętrznym na rozkład parametrów powietrza w pomieszczeniu. Tę analizę przeprowadzono na podstawie obliczeń CFD z wykorzystaniem programu ANSYS Fluent 2022 R2.

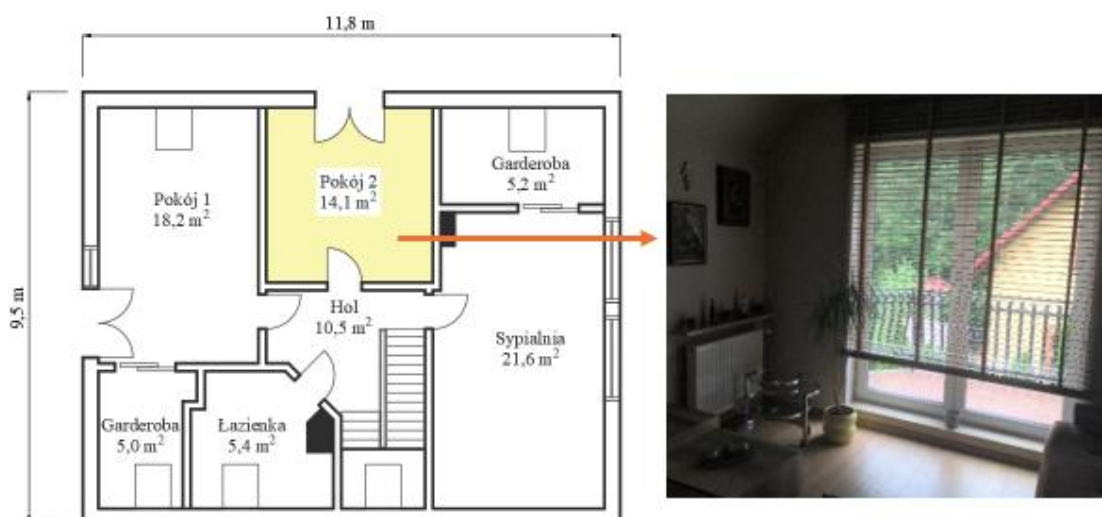
7.1 Charakterystyka programu ANSYS Fluent

Wraz ze wzrostem zaawansowania technik komputerowych pojawiły się nowe możliwości prognozowania numerycznego warunków panujących w budynku poza tradycyjnymi pomiarami. Jedną z metod jest modelowanie numeryczne przy użyciu techniki CFD opierającej się na równaniach różniczkowych będących matematycznym zapisem praw: zachowania masy (równanie ciągłości przepływu), pędu (Naviera-Stokesa), energii (równanie energii) oraz dyfuzji (równanie dyfuzji zanieczyszczeń gazowych). Jednym z najczęściej stosowanych programów do prognozowania numerycznego przepływu płynów, przenoszenia ciepła i reakcji chemicznych dla złożonych geometrycznie zadań jest ANSYS Fluent [217]. Program pozwala na szerokie zastosowanie w symulacjach przemysłowych i naukowych. Obsługuje zaawansowane modele fizyczne: wymiany ciepła przepływów turbulentnych (RANS, LES, DNS), reaktywnych, wielofazowych (Lagrange'a, Eulerowe), wymianę ciepła, transportu masy, oddziaływań faz płynnych z ciałami stałymi (np. FSI – Fluid-Structure Interaction) oraz modeli przepływów wieloskalowych. Posiada bogatą gamę dynamicznych i adaptacyjnych siatek dyskretyzacji oraz szeroki zakres warunków brzegowych [217, 218].

Program Fluent jest szeroko stosowany do symulacji warunków środowiska wewnętrznego dzięki możliwości prognozowania takich parametrów, jak: temperatura, wilgotność, prędkość i jakość powietrza, co ma kluczowe znaczenie dla komfortu mieszkańców oraz efektywności energetycznej budynków. Program pozwala na szczegółowe symulacje wymiany ciepła między powietrzem wewnątrz budynku a jego otoczeniem, uwzględniając zarówno przewodzenie, konwekcję, jak i promieniowanie cieplne. Dzięki temu można przeanalizować, jak różne systemy ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC) wpływają na komfort cieplny mieszkańców. Umożliwia to optymalizację rozwiązań HVAC, aby zapewnić właściwy rozkład parametrów wewnątrz pomieszczeń oraz oszczędności energetyczne.

7.2 Opis pomieszczenia

Zakresem badań objęto pokój 2 o wymiarach $3,6 \times 3,9 \times 2,7$ m (szerokość, długość, wysokość) (Rys. 7.1). W ścianie zewnętrznej znajduje się okno o wymiarach $1,8 \times 2,2$ m (szerokość, wysokość). Pozostałe ściany oddzielają pokój od innych pomieszczeń. W pomieszczeniu, oprócz standardowego wyposażenia, znajduje się grzejnik centralnego ogrzewania.



Rys. 7.1. Rzut piętra budynku jednorodzinnego z zaznaczonym pomieszczeniem testowym (po lewej) oraz zdjęcie pomieszczenia (po prawej)

7.3 Model numeryczny

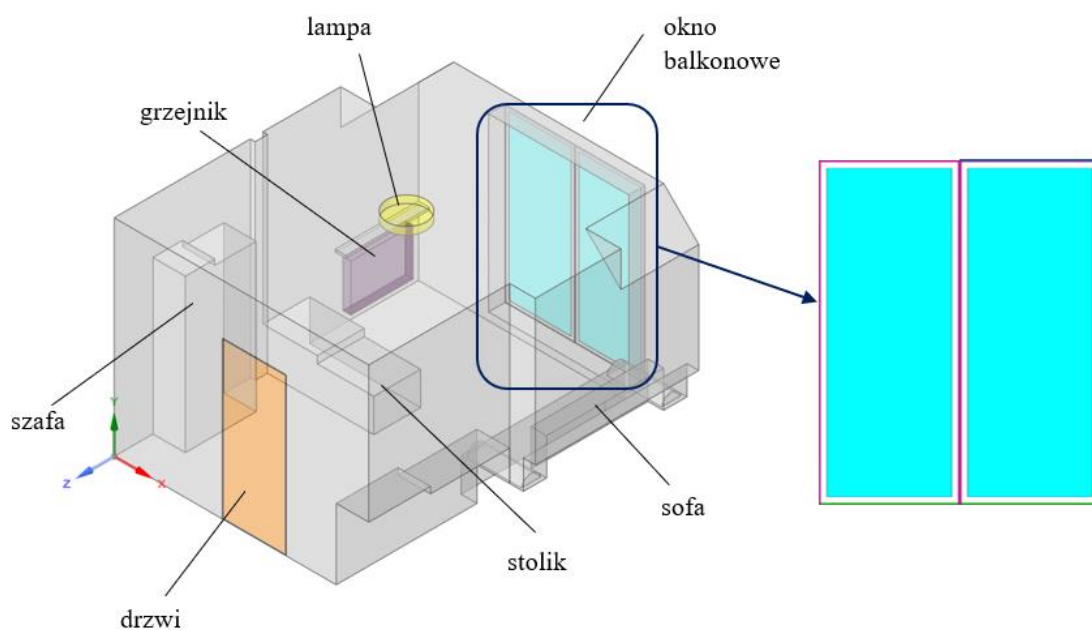
Geometria modelu numerycznego pomieszczenia została przygotowana w programie ANSYS SpaceClaim 2022 R2. Uwzględniono w niej rzeczywiste wymiary gabarytowe i geometrię pomieszczenia, meble, grzejnik, lampę, drzwi oraz okno balkonowe (Rys. 7.2). Podobnie jak w obiekcie rzeczywistym w trakcie pomiarów, w modelu nie brano pod uwagę obecności ludzi.

Na potrzeby uwzględnienia w obliczeniach naturalnej wentylacji, wokół drzwi oraz okna wyodrębniono prostokątną wąską szczelinę. Ze względu na różne konfiguracje ustawienia okna w warunkach brzegowych przy oknie balkonowym została wydzielona część szczeliny w kształcie odwróconej litery U (dla skrzydła lewego) dla okna uchylonego (otwartego) i mikrouchylonego (oznaczona kolorem różowym na Rys. 7.2). Dla okna zamkniętego uwzględniono całą szczelinę (dodatkowo z częścią oznaczoną kolorem zielonym i niebieskim na Rys. 7.2). W obliczeniach z oknem uchylonym (otwartym) i mikrouchylonym jako powierzchnię otwarcia okna brano pod uwagę szczelinę w kształcie odwróconej litery U wokół lewej części skrzydła.

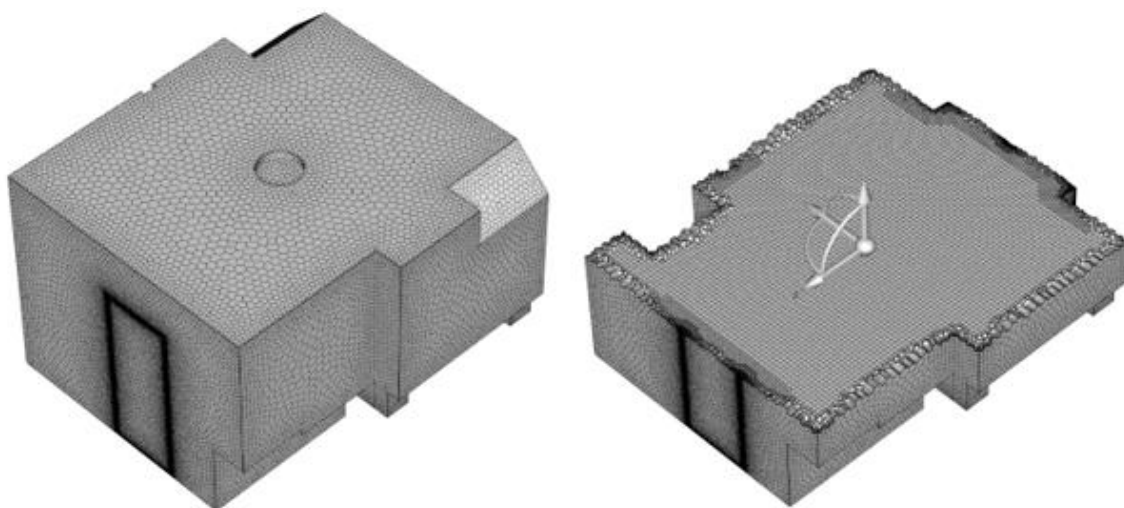
7.4 Siatka obliczeniowa

Geometria modelu została poddana dyskretyzacji w oprogramowaniu ANSYS Fluent Meshing 2022 R2. Zastosowano siatkę niestrukturalną z wykorzystaniem technologii Mosaic (Rys. 7.3). Siatka składała się z 3 242 621 komórek, 13 252 474 powierzchni i 6 944 211 węzłów. Podstawowy wymiar oczka siatki mieścił się w zakresie 3–50 mm. Zastosowano zagęszczenie oczek siatki na powierzchni szczeliny wokół okna balkonowego oraz drzwi. Zadano również 5 warstw elementów przyściennych z przyrostem elementów co do wysokości z mnożnikiem 1,2, o łącznej grubości maksymalnej 10 cm, w warstwie przyściennej przy powierzchni przegród (z wyłączeniem wlotów i wylotów modelu). Maksymalna względna odległość przyścienna wynosiła

$Y^+ = 10,36$. Minimalna jakość ortogonalna siatki (*orthogonal quality*) wynosiła 0,46, a średnia 0,95.



Rys. 7.2. Geometria modelu numerycznego pomieszczenia z wyposażeniem oraz wyodrębniona szczelina wokół okna: w kolorze różowym dla okna uchylonego (otwartego) i mikrouchylonego (skrzydło lewe); w kolorze niebieskim (skrzydła prawego) i zielonym dla dolnej szczeliny



Rys. 7.3. Widok izometryczny pomieszczenia z siatką powierzchniową (po lewej) oraz przekrój przez siatkę objętościową w płaszczyźnie ZX modelu numerycznego badanego pomieszczenia

7.5 Warunki brzegowe

Warunki brzegowe do obliczeń numerycznych przygotowano na podstawie wyników pomiarów opisanych w rozdz. 5.3, danych pogodowych ze stacji meteorologicznej (patrz rozdz. 6.4.6), dokumentacji technicznej obiektu oraz przyjętych założeń. W Tab. 7.1 przedstawiono wszystkie warianty obliczeniowe (13 wariantów) z informacją o szczegółowych różnicach w ich ustawieniach, okresach obliczeniowych, konfiguracjach okna oraz eksperymencie, z którego były zaczerpnięte warunki brzegowe.

Tab. 7.1. Zestawienie wariantów symulacyjnych w ramach walidacji modelu

Numer wariantu	Okres roku	Konfiguracja ustawienia okna	Pomiary	Modyfikacja/Zmiana
M1a	zimowy	zamknięte	(b)	Warunek brzegowy: <i>Inlet-Vent</i>
M1b	zimowy	zamknięte	(b)	Warunek brzegowy <i>Mass-Flow-Inlet</i> przypisany do powierzchni szczeliny okna podzielonej na segmenty
M1c	zimowy	zamknięte	(b)	Warunek brzegowy <i>Mass-Flow-Inlet</i> przypisany do powierzchni szczeliny okna niepodzielonej na segmenty
M2a	zimowy	mikrouchył	(b)	Warunek brzegowy <i>Mass-Flow-Inlet</i> przypisany do powierzchni szczeliny całego okna podzielonej na segmenty
M2b	zimowy	mikrouchył	(b)	Warunek brzegowy <i>Mass-Flow-Inlet</i> przypisany do powierzchni szczeliny tylko mikrouchyłu
M2c	zimowy	mikrouchył	(b)	Zmiana modelu turbulencji na: <i>k-epsilon (RNG)</i>
M2d	zimowy	mikrouchył	(b)	Zmiana modelu turbulencji na: <i>k-epsilon (standard)</i>
M2e	zimowy	mikrouchył	(b)	Zmiana modelu turbulencji na: <i>SST</i>
M3a	przejściowy	zamknięte	(a), (c)	-
M3b	przejściowy	zamknięte	(a), (c)	Zmiana mocy grzejnika
M3c	zimowy	zamknięte	(a), (c)	Zmiana mocy grzejnika
M4a	zimowy	uchylone	(b)	-
M4b	zimowy	uchylone	(b)	Do analizy wyników nie uwzględniono pierwszej osi pomiarowej w odległości od okna 0,16 m

- (a) rejestracja temperatury i wilgotności względnej powietrza wewnętrznego – opisano w rozdz. 5.2.1;
 (b) pomiar pionowego rozkładu prędkości powietrza wewnętrznego – opisano w rozdz. 5.2.4;
 (c) pomiar wymiany powietrza w pomieszczeniu – opisano w rozdz. 5.2.2.

Badania (a) oraz (c) przeprowadzono dla okresu zimowego i przejściowego, gdy temperatura powietrza zewnętrznego wynosiła: 2.9°C dla zimy oraz 17°C dla okresu przejściowego. Badania (b) były przeprowadzone dla okresu zimowego, gdy temperatura powietrza zewnętrznego wynosiła -4°C. Pomiary (c) i (a) przeprowadzono przy zamkniętym oknie w pomieszczeniu, z kolei badania (b) podczas zimy były wykonywane przy oknie zamkniętym, mikrouchylonym oraz uchylonym (otwartym) (Rys. 5.7).

W każdym wariancie obliczeniowym dla wszystkich przegród przezroczystych i nieprzezroczystych pomieszczenia zadano współczynniki przenikania ciepła (Tab. 5.1). Dla każdej przegrody zadano również odpowiednią (w zależności od wariantu) temperaturę powietrza zewnętrznego albo wewnętrznego, ustaloną w trakcie eksperymentu, ich wartości zestawiono w Tab. 7.2. Wilgotność względna powietrza otaczającego domenę obliczeniową wynosiła: 57% (wariant 1), 47% (wariant 2a–2d), 43% (wariant 3a–3d), 44% (wariant 4a–4b) i 39% (wariant 2e). Natomiast dla powietrza zewnętrznego w okresie przejściowym i zimowym wynosiła odpowiednio 62% (wariant 1), 65% (warianty 2a–2d, 3–4) i 81% (wariant 2e).

Przegrody pomieszczenia opisano warunkiem typu *Wall*, tak samo grzejnik oraz oświetlenie. Zyski ciepła od lampy (w godzinach z włączonym oświetleniem) wyrażono za pomocą jednostkowego strumienia ciepła wynoszącego 2 W/m².

Wentylację naturalną pomieszczenia uwzględniono w obliczeniach za pomocą odpowiednich warunków brzegowych: wlot powietrza przez nieszczelności okna, wylot przez nieszczelności w drzwiach. Szczelinę wokół drzwi opisano warunkiem typu *Outlet*. Z kolei dla szczeliny wokół okna balkonowego przyjęto warunek typu *Mass-flow-inlet* z odpowiednio zadaną wartością strumienia powietrza infiltrującego do pomieszczenia zbliżoną do wartości z eksperymentu (Tab. 7.3). Ze względu na brak możliwości przeprowadzenia jednoczesnych pomiarów profilu prędkości i wymiany powietrza w pomieszczeniu wartości strumienia powietrza dla wariantów weryfikacyjnych – profile prędkości (2a–2d, 3, 4) – zadano, bazując na wynikach symulacji energetycznych budynku przeprowadzonych w ramach walidacji modelu całego budynku (rozdz. 6.5).

Tab. 7.2. Zestawienie temperatury powietrza otaczającego domnę obliczeniową w miejscu występowania poszczególnych przegród przezroczystych i nieprzezroczystych modelu numerycznego pomieszczenia

Przegroda		Temperatura powietrza,	Numer wariantu obliczeniowego
Ściana zewnętrzna		16,5°C	1
		-4,0°C	2a-2d, 3-4
		2,9°C	2e
Dach		16,5°C	1
		-4,0°C	2a-2d, 3-4
		2,9°C	2e
Ściana wewnętrzna		20,8°C	1
		20,0°C	2a-2d, 3-4
		21,0°C	2e
Sufit		13,5°C	1
		2,6°C	2a-2d, 3-4
		4,3°C	2e
Podłoga		22,4°C	1
		19,9°C	2a-2d, 3-4
		21,8°C	2e
Drzwi		20,8°C	1
		20,0°C	2a-2d, 3-4
Okno	Rama	16,5°C	1
		-4,0°C	2a-2d, 3-4
		2,9°C	2e
	Szyba	16,5°C	1
		-4,0°C	2a-2d, 3-4
		2,9°C	2e

Tab. 7.3. Zestawienie danych opisujących warunków brzegowy szczeliny okna balkonowego

Wariant	Konfiguracja ustawienia okna	Okres roku	Zadany/oczekiwany strumień powietrza, kg/s	Źródło danych
M1a, M1c	zamknięte	zima	0,00115	symulacje
M2a–M2e	mikrouchył	zima	0,01067	symulacje
M3a, M3b	zamknięte	przejściowy	0,00093	pomiar
M3c	zamknięte	zima	0,00143	pomiar
M4a, M4b	uchylone	zima	0,05292	symulacje

7.6 Przebieg symulacji

Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone w warunkach ustalonych, trójwymiarowych i nieizotermicznych przy pomocy modułu ANSYS Fluent Solver z podwójną precyzją (*Double Precision*). Zastosowano używany często w praktyce inżynierskiej model turbulencji w podejściu RANS – *Realizable k-epsilon* z zaimplementowanymi funkcjami przyściennymi Enhanced Wall Treatment. Model turbulencji został porównany z pozostałymi modelami stosowanymi do prognozowania wentylacji naturalnej. Analiza porównawcza modeli została opisana w rozdz. 7.7. Modelowanie promieniowania cieplnego między przegrodami i obiektami znajdującymi się wewnątrz pomieszczenia przeprowadzono modelem Discrete Ordinates (DO). Dla sprawdzenia zbieżności rozwiązania kontrolowano przebieg względnego błęd iteracji oraz wartości zmiennych w punktach monitorowania, aby ocenić, czy uzyskany wynik osiągnął stan ustalony. Oczekiwana zbieżność wyników symulacji wystąpiła po około 2000–8000 kroków iteracji w zależności od wariantu. Jednocześnie średni błąd względny dla wszystkich równań bilansu mieścił się do wartości $1.0E-5$.

7.7 Walidacja eksperymentalna modelu numerycznego CFD

Walidacja eksperymentalna wyników obliczeń CFD miała na celu sprawdzenie, czy przygotowany model numeryczny przepływu powietrza i ciepła umożliwia przeprowadzenie symulacji wentylacji naturalnej przy zastosowaniu różnych konfiguracji otwarcia okna, uzyskując porównywalne wyniki do wyników pomiarów. W pracy przedstawiono wybraną część walidacji, ze względu na jej obszerny zakres, składającą się z następujących etapów:

1. Weryfikacja warunku brzegowego wlotu powietrza dla okna zamkniętego i otwartego;
2. Weryfikacja modelu turbulencji;
3. Walidacja parametrów powietrza (temperatury i wilgotności) przy zamkniętym oknie w okresie przejściowym;
4. Walidacja profilu prędkości dla okresu zimowego dla wszystkich konfiguracji otwarcia okna.

Analizę ilościową przeprowadzono w oparciu o wskaźniki statystyczne, tj.: błąd bezwzględny (D_i), średni błąd względny, ($|\bar{D}|$), współczynnik korelacji (R) opisanych wzorami (6), (7), (8) (patrz. rozdz. 6.5). Wartości wskaźników D_i i $|\bar{D}|$ porównano z dokładnością mierników pomiarowych.

Do oceny zgodności modelu CFD nie wykorzystano wskaźników Normalized Mean Square Error ($NMSE$), Fractional Bias (FB) (opisanych wzorami (9) i (10)) ze względu na bardzo niskie wartości wyników pomiarów (bliskie zeru), które mogą zawyżać różnice, pomimo wysokiej zgodności wyników. Zgodnie z literaturą [219] wskaźniki mogą być używane, gdy $|M_i| \geq 0,1$ – w tych badaniach średnia wartość wyniosła: $\bar{M}_l = 0,010$ m/s (okno zamknięte), $\bar{M}_l = 0,016$ m/s (mikrouchył), $\bar{M}_l = 0,035$ m/s (otwarte). Zgodnie z dostępną literaturą [219, 220] ich wartość powinna być zbliżona do 0, dla $NMSE < 1,5$, a dla FB w przedziale od -0,3 do 0,3. Jednakże te wskaźniki wykorzystano do porównania wyników w trakcie prowadzonych analiz wyników walidacji. Stanowiły one kryterium oceny zastosowanych rozwiązań (modelu turbulencji, sposobu zadawania warunków brzegowych). Wskaźniki $|\bar{D}|$, $NMSE$, FB , R zostały obliczone dla wyników pomiarów rozkładu prędkości dla wszystkich konfiguracji okien (Tab. 7.4). Natomiast wskaźnik błędu bezwzględnego wykorzystano do porównania wartości pomiarów temperatury i wilgotności względnej (Tab. 7.5).

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^k (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^k (M_i \times S_i)} \quad (9)$$

$$FB = \frac{\bar{M}_l - \bar{S}_l}{0.5 \times (\bar{M}_l + \bar{S}_l)} \quad (10)$$

gdzie: k – liczba wartości porównywanych, M_i – wartość pomiarowa, S_i – wartość symulowana, $\bar{M}_l$ – średnia arytmetyczna wartości pomiarowych, $\bar{S}_l$ – średnia arytmetyczna wartości symulowanych.

W pierwszym etapie walidacji przeprowadzono symulacje dla dwóch rodzajów warunków brzegowych wlotu powietrza przez szczelinę w oknie: *Inlet-Vent* (M1a) i *Mass-Flow-Inlet* (M1b) w celu oceny ich zasadności stosowania w badanym modelu. W przypadku warunku *Inlet-Vent* strumień powietrza jest obliczany pośrednio przez zadanie ciśnienia na wlocie, natomiast w przypadku *Mass-Flow-Inlet* bezpośrednio przez strumień masy powietrza. Przy warunku *Inlet-Vent* nie uzyskano strumienia zbliżonego do otrzymanego w trakcie pomiarów. Najmniejsza wartość strumienia powietrza, uzyskana przy zadanym ciśnieniu 0 Pa, wyniosła 11 m³/h. W związku z tym do dalszych obliczeń zdecydowano użyć warunku *Mass-Flow-Inlet*.

Następnie sprawdzono, czy strumień powietrza wpływającego do pomieszczenia powinien być przypisany do jednej powierzchni (całej szczeliny okna) (M1c) czy do powierzchni

podzielonej na mniejsze segmenty tak, aby dało to możliwości proporcjonalnego podziału tego strumienia (M1b). Segmenty zostały pokazane w rozdz. 7.3. Ze względu na uzyskanie bardzo zbliżonych wyników wskaźników $|\bar{D}|$, $NMSE$ i FB przy bardzo wysokiej korelacji dla obydwu przypadków uznano oba podejścia za poprawne (Tab. 7.4). Do dalszych obliczeń zdecydowano się podzielić szczelinę na mniejsze obszary (M1b), ze względu na możliwość wykorzystania takiego samego podziału również przy oknie mikrouchylonym i uchylonym.

Tab. 7.4. Zestawienie wskaźników statystycznych

Numer wariantu	$ \bar{D} $	$NMSE$	FB	R
M1b	0,008 m/s	0,26	-0,56	0,96
M1c	0,008 m/s	0,29	-0,56	0,97
M2a	0,015 m/s	0,53	-0,58	0,83
M2b	0,018 m/s	0,63	-0,67	0,85
M2c	0,023 m/s	0,83	-0,78	0,77
M2d	0,023 m/s	0,72	-0,79	0,82
M2e	0,025 m/s	0,74	-0,79	0,78
M4a	0,053 m/s	1,98	-0,86	0,34
M4b	0,031 m/s	0,62	-0,65	0,72

W związku z tym w kolejnym kroku sprawdzono, czy w przypadku okna otwartego (mikrouchyłu bądź uchylonego) należy uwzględniać wpływ powietrza przez całą szczelinę wokół okna, podzieloną na segmenty (M2a), czy tylko przez powierzchnię mikrouchyłu (M2b). Niższe wartości wskaźników $|\bar{D}|$, $NMSE$ i FB przy wysokiej korelacji wyników uzyskano dla przypadku (M2a) (Tab. 7.1), dlatego do dalszych obliczeń zdecydowano uwzględniać całą powierzchnię szczeliny okna (podzieloną na segmenty).

W drugim etapie walidacji sprawdzono, czy wstępnie wybrany model turbulencji *k-epsilon* (*Realizable*) (M2a) daje najbardziej wiarygodne wyniki w porównaniu z innymi najczęściej stosowanymi modelami turbulencji do prognozowania działania wentylacji naturalnej: M2c – *k-epsilon* (*RNG*), M2d – *k-epsilon* (*standard*) i M2e – *SST*. Najniższe wartości współczynników $|\bar{D}|$, $NMSE$ i FB przy wysokiej korelacji wyników uzyskano dla modelu *k-epsilon* (*Realizable*), co potwierdziło zasadność jego wstępnego wyboru.

W trzecim etapie walidacji przeprowadzono symulacje przy zamkniętym oknie w okresie przejściowym (wariant M3a i M3b) i zimowym (wariant M3c), ponieważ dla tej konfiguracji otwarcia okna zostały przeprowadzone pomiary wymiany powietrza w pomieszczeniu (Tab. 7.5). Założono, że w okresie zimowym grzejnik w pomieszczeniu był wyłączony, natomiast w okresie przejściowym przeprowadzono obliczenia dla wyłączonego i lekko nagrzanego grzejnika. Zarówno dla okresu przejściowego, jak i zimowego różnice w wartościach prognozowanych i pochodzących z eksperymentu były nieznaczne, przy włączonym grzejniku nie przekraczały one dokładności mierników

pomiarowych. Największą rozbieżność wartości temperatury powietrza otrzymano w okresie przejściowym przy wyłączonym grzejniku (M3a), jednak wynosiła ona zaledwie 0,48°C. Natomiast w przypadku wilgotności względnej maksymalny błąd bezwzględny wyniósł 2%, co mieści się w granicach błędu pomiarowego. Uznano, że warunki cieplno-wilgotnościowe w modelu numerycznym zostały poprawnie odwzorowane.

Tab. 7.5. Zestawienie wyników symulacji parametrów powietrza przy zamkniętym oknie

Wariant	Okres	Pomiary	Symulacja	Różnica (błąd bezwzględny)	Uwagi
M3a	Przejściowy (22.10.2020 $\dot{V}=2,8 \text{ m}^3/\text{h}$)	$t=20,3^\circ\text{C}$ $RH=57\%$	$t=19,8^\circ\text{C}$ $RH=58\%$	$D_t = 0,5^\circ\text{C}$ $D_i = 1,5\%$	Grzejnik wyłączony
M3b	Przejściowy (22.10.2020 $\dot{V}=2,8 \text{ m}^3/\text{h}$)	$t=20,3^\circ\text{C}$ $RH=57\%$	$t=20,4^\circ\text{C}$ $RH=56\%$	$D_t = 0,1^\circ\text{C}$ $D_i = 0,7\%$	Grzejnik włączony zadaną temperaturą 25°C
M3c	Zimowy (21.01.2021) $\dot{V}=4,3 \text{ m}^3/\text{h}$	$t=21,4^\circ\text{C}$ $RH=39\%$	$t=21,3^\circ\text{C}$ $RH=37\%$	$D_t = 0,1^\circ\text{C}$ $D_i = 2\%$	Grzejnik włączony zadaną temperaturą 50°C

W czwartym etapie przeprowadzono weryfikację rozkładów prędkości powietrza w określonych odległościach od okna przedstawionych na Rys. 7.4 (okno zamknięte), Rys. 7.5 (mikrouchył), Rys. 7.6 (uchylone). W przypadku okna zamkniętego największe różnice otrzymano nad podłogą, wynosiły one maksymalnie $D_t=0,038 \text{ m/s}$ (0,16 m), a w pozostałych wysokościach prognozowane wartości prędkości nie przekroczyły błędu pomiarowego miernika $\pm 0,02 \text{ m/s}$. Pomimo bardzo małych wartości prędkości powietrza udało się spełnić wymagania tylko niektórych kryteriów oceny ilościowej: średni błąd bezwzględny był mniejszy od dokładności miernika i wyniósł $|\bar{D}| = 0,008 \text{ m/s}$, wskaźnik NMSE był mniejszy niż 1,5 ($NMSE=0,26$) oraz uzyskano bardzo wysoką korelację wyników $R=0,96$, a sam przebieg rozkładu prędkości powietrza był zbliżony do uzyskanego przebiegu z obliczeń numerycznych. Wartość wskaźnika FB wyniosła -0,56. Profile prędkości otrzymane przy oknie w pozycji mikrouchyłu były nieznaczne. Średni błąd bezwzględny $|\bar{D}|=0,0018 \text{ m/s}$ mieścił się w zakresie błędu pomiarowego miernika. Największe rozbieżności wykraczające poza dokładność sprzętu pomiarowego były przy podłodze. Uzyskano wysoką korelację wyników $R=0,85$. Stwierdzono bardzo zbliżone odwzorowanie profilu prędkości z eksperymentu i symulacji dla punktów od 0,65 m do 1,65 m (Rys. 7.6). Największe różnice otrzymano podobnie jak w przypadku mikrouchyłu i okna zamkniętego przy podłodze. Porównywalność profili wystąpiła w gorszym stopniu w przypadku odległości 0,45 m od okna, szczególnie dla dwóch wysokości 0,41 m i 0,66 m, wartości prognozowane odbiegły od wartości rzeczywistych o 0,14 m/s. Natomiast dla osi

znajdującej się w odległości 0,25 m nie udało się odwzorować profilu prędkości. W Tab. 7.4 przedstawiono porównanie wskaźników zgodności modelu, biorąc pod uwagę wszystkie punkty oraz wykluczając pierwszą oś pomiarową znajdującą się najbliżej okna ze względu na dużą rozbieżność w wynikach i mogącą zawyżać ostateczne wyniki całego profilu prędkości, co potwierdzają wartości zaprezentowane w tabeli. Średni błąd bezwzględny $|\bar{D}|$ wyniósł 0,031 m/s, czyli był nieznacznie większy od dokładności miernika, natomiast poza pierwszą osią uzyskano wysoką korelację wyników wynoszącą 0,72, spełniającą założone kryterium.

Otrzymane wyniki walidacji wykazały wysoką dokładność prognozowania numerycznego przepływu powietrza przy zamkniętym oknie, natomiast uwidoczniły częściowe problemy z modelowaniem przepływu powietrza przy uchylonym oknie.

Pomimo braku 100% zgodności modelu CFD z pomiarami, porównując stopień różnicy pomiędzy wynikami pomiarów a symulacji występujący w innych badaniach [143, 221] stwierdzono, że niniejszy model w bardzo dobrym stopniu odwzorował warunki panujące w pomieszczeniu. Przykładowo w pracy Elshafei [143] maksymalna wartość błędu bezwzględnego prędkości powietrza przy zamkniętych oknach wynosiła 0,01 m/s, a w niniejszej pracy była nieznacznie większa $D_i=0,038$ m/s. Jednak wartość $D_i=0,038$ m/s występowała w rejonie przy podłodze, w którym w porównywanej pracy [143] nie było punktów pomiarowych, były zlokalizowane tylko w środkowej części pomieszczenia. W tym rejonie w niniejszej pracy wartość D_i była mniejsza niż 0,01 m/s, co potwierdza wysoką dokładność modelu. Natomiast w pracy Hajdukiewicz [221] maksymalny błąd bezwzględny prędkości powietrza przy uchylonych oknach wyniósł 0,2 m/s i występował on w odległości 1,1 m od okna, przy czym nie było punktów pomiarowych w bliższej odległości. Dla porównania w niniejszej pracy błąd ten był mniejszy i nie przekraczał w tej odległości 0,1 m/s. Badacze w przytoczonych pracach również wskazali na trudności modelowania przepływu powietrza bezpośrednio przy oknie, które wystąpiły w niniejszej pracy.

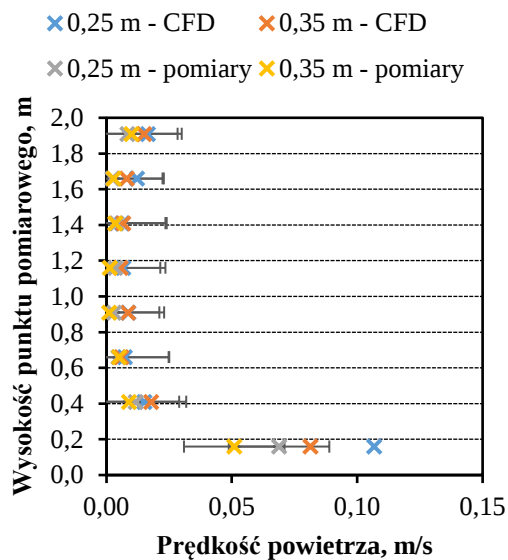
Przy modelowaniu przepływu powietrza przez okno zasadniczą kwestią jest wybór odpowiedniego warunku brzegowego dla wlotu powietrza. W programach CFD istnieje kilka typów warunków brzegowych wlotu powietrza (m.in. *velocity-inlet*, *pressure-inlet*, *mass-flow-inlet*, *inlet-vent*), które stosuje się w zależności od dostępnych danych i natury analizowanego przepływu płynu oraz celu symulacji. W idealnych przypadkach dane potrzebne do zadania warunku brzegowego powinny pochodzić z wyników pomiarowych. Jednak nie zawsze jest to możliwe np. z powodu braku dostępu do odpowiedniego sprzętu pomiarowego. W takim przypadku dane pozyskuje się np. z obliczeń inżynierskich bądź w oparciu o dane dostępne w innych publikacjach. W pracy porównano efekty zastosowania warunków brzegowych *mass-flow inlet* oraz *inlet-vent* tak, aby wybrać najbardziej odpowiedni do przygotowanego modelu. W przypadku bardzo małych przepływów powietrza, szczególnie przy zamkniętym oknie, najlepiej sprawdził się warunek brzegowy *mass-flow-inlet*, gdzie uzyskano lepszą wiarygodność modelu niż przy zadanym warunku *inlet-vent*. Co więcej, dane potrzebne do wprowadzenia warunku brzegowego *mass-flow-inlet* pochodziły z wiarygodnego źródła, jakim były wyniki

symulacji energetycznych zwalidowanego modelu m.in. pod kątem strumienia powietrza infiltrującego do pomieszczenia.

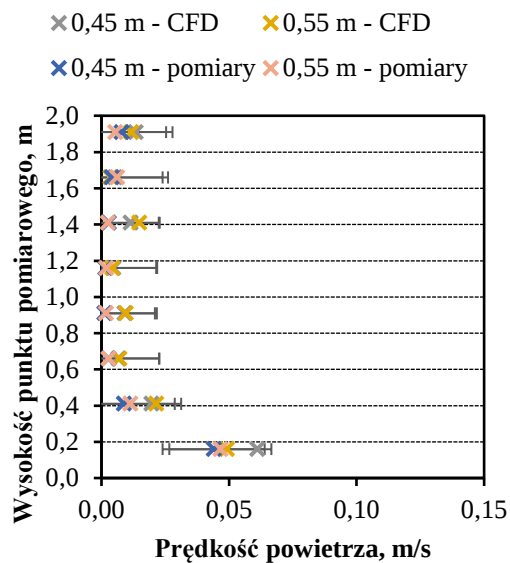
Natomiast należy mieć na uwadze jedno z ograniczeń warunku brzegowego *mass-flow-inlet*, jakim jest nieuwzględnianie przepływu wstecznego przez okno. Ten warunek brzegowy uwzględnia jedynie jednokierunkowy przepływ powietrza do domeny obliczeniowej (pomieszczenia). Pomija częściowy wypływ powietrza z pomieszczenia przez część powierzchni uchylonej, który występuje w rzeczywistych warunkach. Z kolei warunek *inlet-vent* daje taką możliwość, ale przy odpowiedniej wielkości strumienia. Brak dwukierunkowości przyływu powietrza przez okno przy zastosowaniu warunku brzegowego *mass-flow-inlet* mógł mieć wpływ na ostateczny rozkład parametrów powietrza w bliskiej odległości od uchylonego okna (do pół metra), gdzie zaobserwowano największe rozbieżności w wynikach. Jednak jest to obszar nie znajdujący się w zdefiniowanej w rozdziale 8.2.3 strefie przebywania ludzi i nie był brany pod uwagę przy ocenie komfortu cieplnego.

W badaniach naukowych [140, 147, 221-223] można spotkać się z podejściem do modelowania przepływu powietrza przez uchylone okno nieuwzględniającym pozostałych szczelin okna, a jedynie powierzchnie otwarcia okna, czyli w sposób uproszczony. Jak pokazały wyniki symulacji (M1b vs. M1c oraz M2a vs. M2b) oba podejścia są poprawne. Prędkości powietrza w punktach monitorowania były o zbliżonych wartościach. Podział na segmenty nie podnosi znacząco wiarygodności modelu, nawet przy małych wartościach strumienia infiltrującego do pomieszczenia. W związku z tym wybór modelowania przyływu powietrza przez całą szczelinę okienną bądź jej część (bez szczeliny w dolnej części okna) jest dowolny i pozostanie po stronie badaczy.

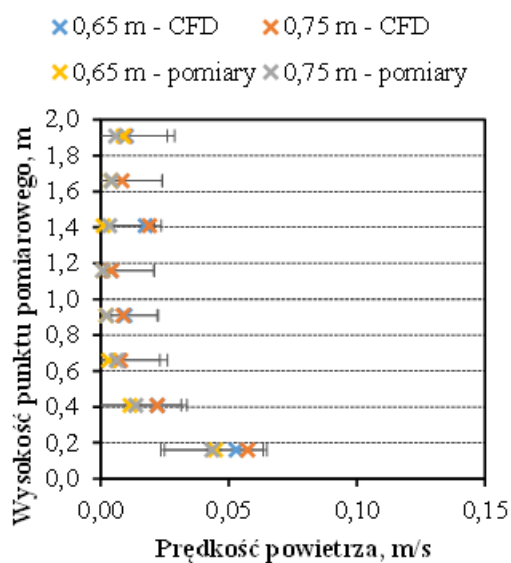
Podsumowując, przygotowany model numeryczny wybranego pomieszczenia w budynku jednorodzinnym pozwolił na przeprowadzenie szeregu symulacji wentylacji naturalnej przy zastosowaniu różnych konfiguracji otwarcia okna, uzyskując porównywalne wyniki do wyników pomiarów. Analiza ilościowa wykazała wiarygodność modelu. W związku z tym, gotowy model CFD może zostać wykorzystany do dalszych badań.



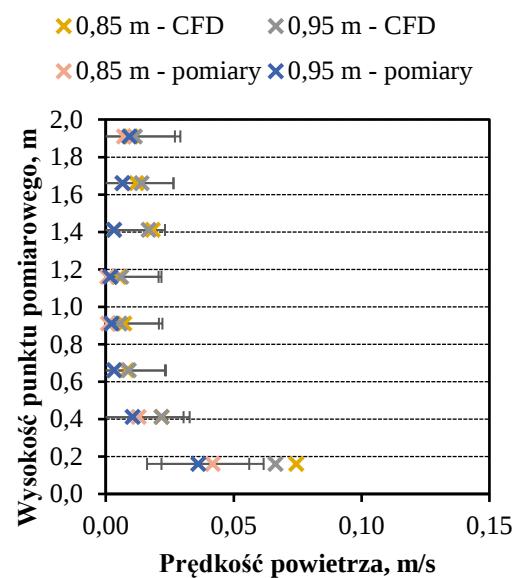
(a)



(b)

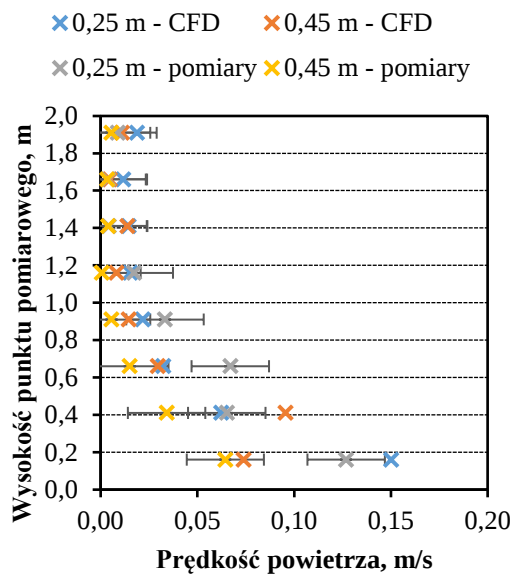


(c)

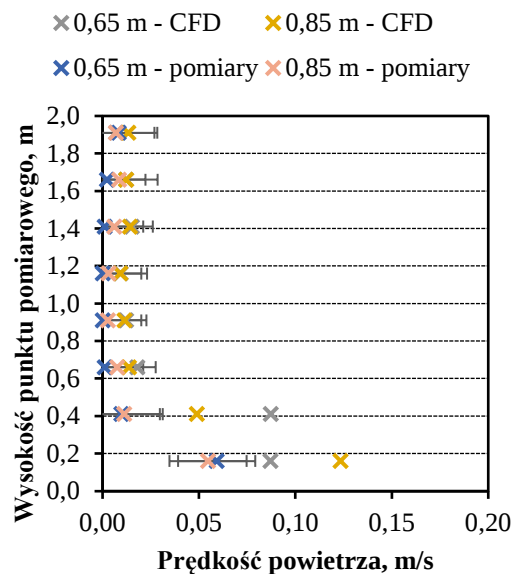


(d)

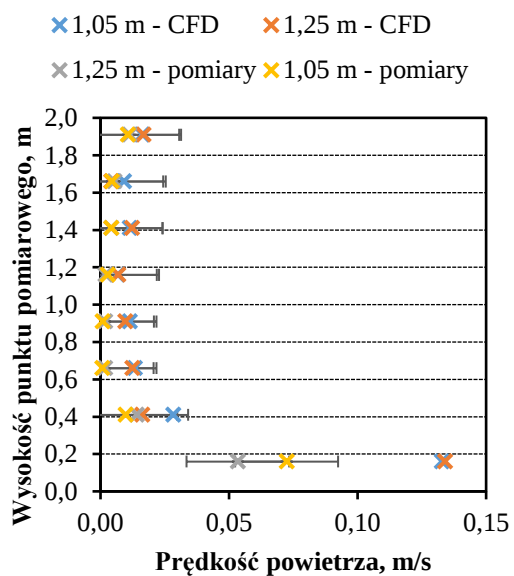
Rys. 7.4. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych dla profilu prędkości przy zamkniętym oknie z zaznaczonymi słupkami błędów w odległości od okna (wariant M1b): a) 0,25 i 0,35 m, b) 0,45 m i 0,55 m, c) 0,65 m i 0,75 m, d) 0,85 m i 0,95 m



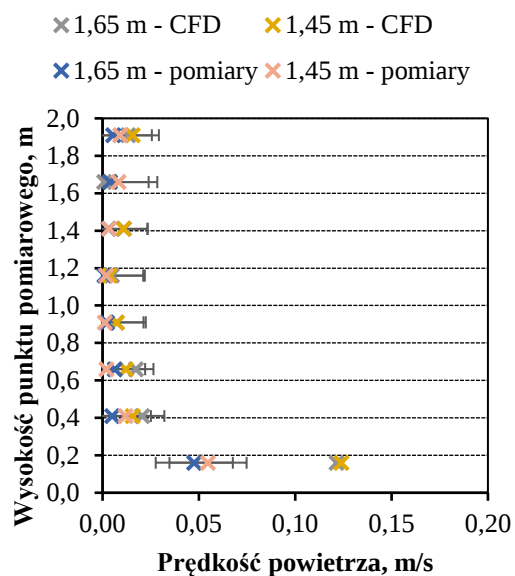
(a)



(b)

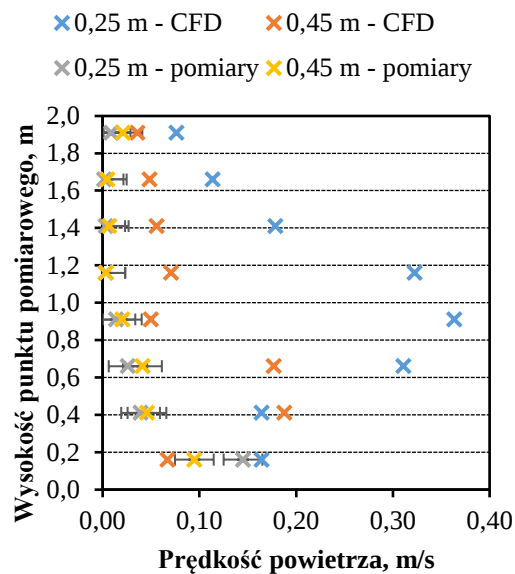


(c)

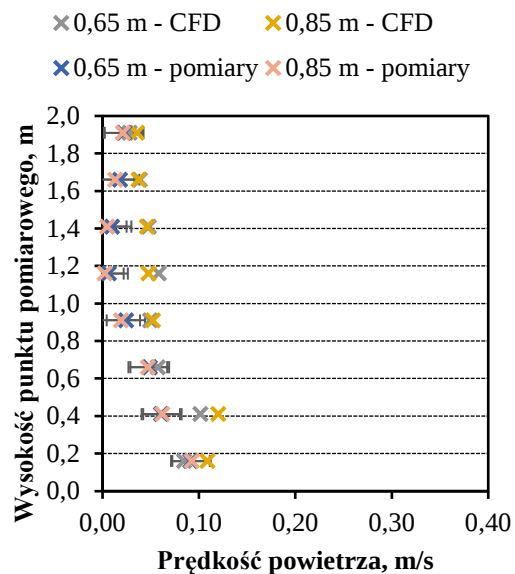


(d)

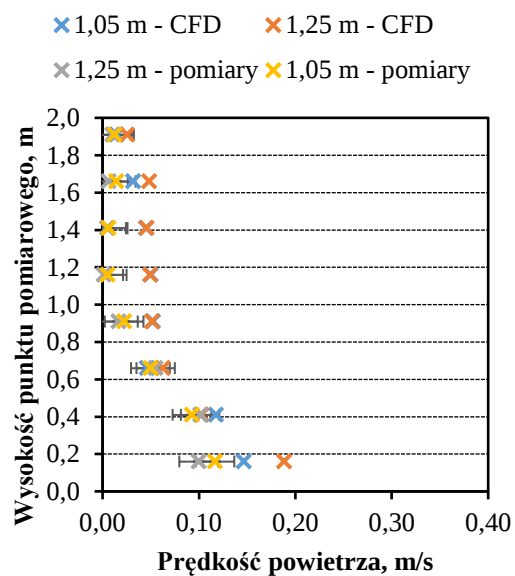
Rys. 7.5. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych dla profilu prędkości przy oknie w pozycji mikrouchyłu z zaznaczonymi słupkami błędów w odległości od okna (wariant M2a):
 a) 0,25 i 0,45 m, b) 0,65 m i 0,85 m, c) 1,05 m i 1,25 m, d) 1,45 m i 1,65 m



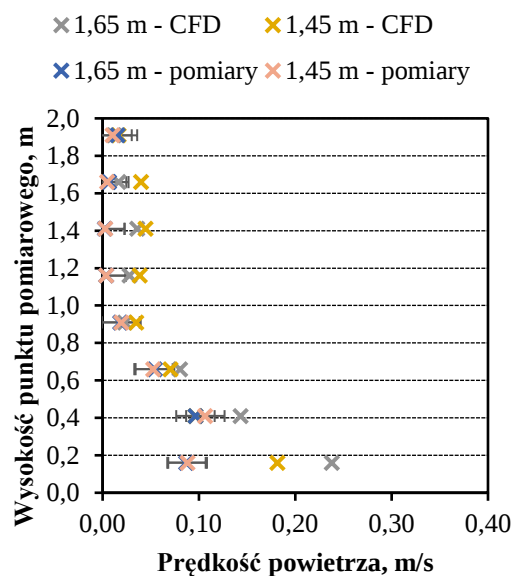
(a)



(b)



(c)



(d)

Rys. 7.6. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych dla profilu prędkości przy oknie w pozycji uchylonej z zaznaczonymi słupkami błędów w odległości od okna (wariant M4a):

a) 0,25 i 0,45 m, b) 0,65 m i 0,85 m, c) 1,05 m i 1,25 m, d) 1,45 m i 1,65 m

8 Studium przypadku

Studium przypadku obejmowało przeprowadzenie obliczeń:

- W ujęciu globalnym: symulacji energetycznej budynku w celu oceny efektywności pasywnego chłodzenia pod kątem zapewnienia warunków komfortu cieplnego mieszkańców i zużycia energii oraz porównanie go z chłodzeniem mechanicznym;
- W ujęciu lokalnym: prognozowania numerycznego CFD w celu analizy parametrów powietrza wewnętrznego (temperatury i prędkości) oraz oceny wystąpienia ryzyka przeciągu.

8.1 Symulacje energetyczne budynku

Po przeprowadzonej walidacji modelu do dalszych obliczeń symulacji energetycznej budynku przyjęto takie same założenia jak w trakcie walidacji dotyczącej konstrukcji przegród budynku, oświetlenia, kroku czasowego symulacji. Zmieniono jednak następujące założenia:

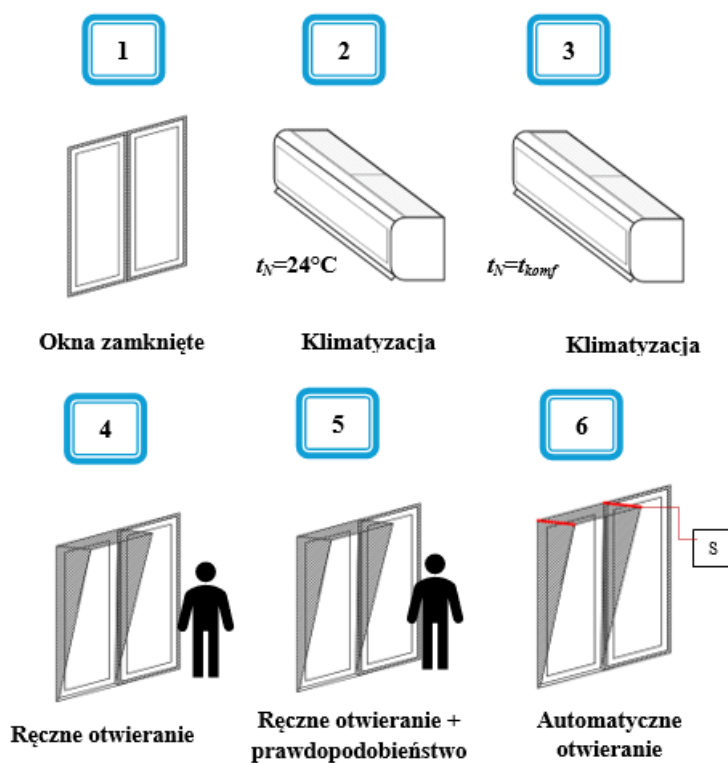
- Harmonogram przebywania ludzi został przygotowany w oparciu o zachowanie tradycyjnej rodziny 2+2 (taki model jest najbardziej popularny w polskich warunkach). W załączniku nr 2 przedstawiono harmonogramy przebywania ludzi oraz profile zysków wewnętrznych w poszczególnych pomieszczeniach. Założono, że w sypialni śpią 2 osoby, w pokoju 1 i 2 po jednej (dzieci w wieku nastoletnim). Przyjęto, że w trakcie dnia mieszkańcy wykonują pracę lekką. W Tab. 8.1 podano wartości zysków wewnętrznych;
- Zrezygnowano w rolet wewnętrznych;
- We wszystkich pomieszczeniach mieszkalnych w okresie grzewczym (od września do maja) zadano temperaturę 21°C, natomiast w łazienkach 24°C, z nocnym jej obniżeniem do 18°C. Garaż oraz kotłownia były ogrzewane do 8°C;
- Chłodzenie mechaniczne i pasywne budynku było realizowane od maja do września;
- Dla celów porównawczych wentylacji jednostronnej i poprzecznej przyjęto, że drzwi wewnętrzne do wszystkich pomieszczeń (z wyjątkiem wiatrołapu i garażu, gdzie zawsze były zamknięte) będą w przypadku wentylacji poprzecznej otwarte, a jednostronnej zamknięte.

Tab. 8.1. Wewnętrzne zyski ciepła

Zysk ciepła	Wartość	Występowanie
Ludzie	126 W/osobę (67% ciepło jawne + 33% utajone)	Wszystkie strefy, wg harmonogramu
Lodówka	150 W	Salon, stale
Kuchenka	300 W	Salon, wg harmonogramu
Zmywarka	50 W	Salon, wg harmonogramu
Telewizor	100 W	Salon, wg harmonogramu
Komputer	100 W	Gabinet, Pokój 1 wg harmonogramu
Kąpiel (parująca woda)	968 W	Łazienka 2, wg harmonogramu
Oświetlenie	2 W/m ²	Zgodnie z harmonogramem i funkcją „DayLightingControl”

8.1.1 Warianty

Na Rys. 8.1 przedstawiono rozpatrywane sposoby chłodzenia budynku w ramach studium przypadku. Założenia do każdego z nich opisano poniżej.



Rys. 8.1. Schemat wariantów chłodzenia budynku w ramach studium przypadku

Wariant 1: Zamknięte okna przez cały czas – przypadek teoretyczny

Przypadek dotyczył teoretycznej sytuacji, w której okna we wszystkich pomieszczeniach były zamknięte przez cały czas. Nie był realizowany żaden system chłodzenia. Wymiana powietrza odbywała się jedynie na drodze wentylacji naturalnej. Otrzymane wyniki zostały wykorzystywane do analizy porównawczej z pozostałymi przypadkami w celu pokazania efektów zastosowania omawianych sposobów chłodzenia. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch przypadków:

- idealnego systemu ogrzewania – **wariant 1a**,
- systemu ogrzewania uwzględniającego straty – **wariant 1b**.

Wariant 2: Chłodzenie mechaniczne ze stałą wartością nastawy temperatury

W tym przypadku zastosowano chłodzenie mechaniczne za pomocą jednostek klimatyzatorów elektrycznych. Założono, że klimatyzacja włącza się automatycznie, gdy temperatura powietrza przekracza określoną nastawę temperatury (wynoszącą 24°C), a okna w budynku są przez cały czas zamknięte.

Obliczenia były prowadzone dla dwóch przypadków:

- idealnego systemu chłodzenia - **wariant 2a**,
- systemu mechanicznego chłodzenia z uwzględnieniem strat - **wariant 2b**.

Wariant 3: Chłodzenie mechaniczne ze zmienną wartością nastawy temperatury

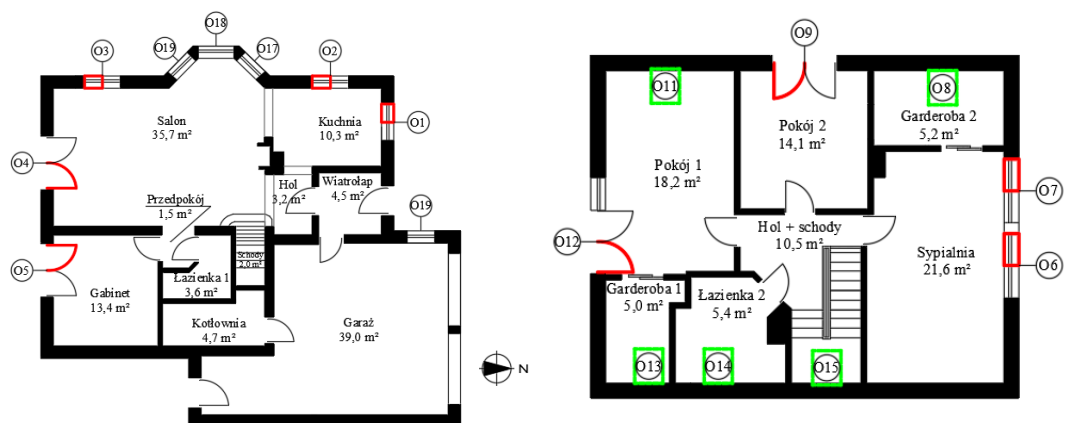
W tym przypadku zastosowano podobnie jak w wariant 2 chłodzenie mechaniczne. Założono, że klimatyzacja włącza się automatycznie, gdy temperatura operatywna powietrza przekracza optymalną temperaturę komfortu adaptacyjnego.

Autorka ma na uwadze ograniczenie stosowania adaptacyjnego modelu komfortu jedynie do budynków z wentylacją naturalną bez chłodzenia mechanicznego. Dlatego symulacje zostały przeprowadzone jedynie dla idealnego systemu chłodzenia i analizowane jako przypadek teoretyczny, służący do porównań z omawianymi pasywnymi sposobami chłodzenia i do oceny ich skuteczności pod względem ograniczenia czasu dyskomfortu w porównaniu z idealnie działającym systemem oraz oszczędności zużycia energii na chłodzenie mechaniczne. Co więcej, na rynku [224] są dostępne termostaty z czujnikami temperatury operatywnej (wyznaczanej na podstawie pomiaru temperatury powietrza i średniej promieniowania w pomieszczeniu mieszkalnym), które umożliwiałyby zastosowanie omawianego systemu w praktyce.

Wariant 4: Otwieranie okien przez mieszkańców

Przypadek polegał na odwzorowaniu ręcznego otwierania okien przez mieszkańców w celu chłodzenia pomieszczeń nieuzdatnionym powietrzem zewnętrznym. Przyjęto następujące założenia:

- Okna są otwierane, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest wyższa od 12°C, temperatura operatywna jest wyższa niż optymalna temperatura komfortu adaptacyjnego i temperatura powietrza wewnętrznego jest wyższa niż zewnętrznego oraz wartość prędkości wiatru jest mniejsza od 10 m/s;
- Ze względu na dużą zawartość wilgoci w powietrzu, okno w łazience 2 jest uchylone przez cały czas obecności mieszkańców, poza okresami występowania deszczu i temperatury zewnętrznej niższej niż 12°C;
- Konfiguracje otwarcia okna są takie jak w trakcie pomiarów: zamknięte, mikrouchył, uchylone (Rys. 5.7);
- Okna dachowe również są w pozycji zamkniętej, mikrouchyłu i uchylonej;
- W przypadku okien balkonowych i tradycyjnych tylko jedno skrzydło jest uchylone (Rys. 8.2), powierzchnie otwarcia okien prezentuje Tab. 8.2;
- W godzinach snu od 22:00 do 6:00 nie ma możliwości zmiany ustawienia okna, okna na parterze są zamknięte (względy bezpieczeństwa). Jedynie w przypadku wystąpienia silnego wiatru (prędkość powyżej 10 m/s) mieszkańcy mogą zamknąć okna na poddaszu;
- W czasie nieobecności ludzi okna na parterze są zamknięte, a na poddaszu pozostawione w pozycji mikrouchyłu, jeżeli na 15 minut przed wyjściem są spełnione kryteria otwarcia okna;
- W przypadku występowania deszczu okna są zamykane;
- Ze względu na stale zamknięte drzwi do garażu i wiatrołapu, okno w garażu nie jest otwierane w celu chłodzenia budynku;
- Zmiana ustawienia okna może nastąpić po upływie co najmniej godziny od poprzedniego ustawienia bądź okna mogą zostać zamknięte w przypadku opuszczenia domu przez mieszkańców lub przed rozpoczęciem godzin snu.



Rys. 8.2. Rzut kondygnacji budynku z zaznaczonymi częściami otwieralnymi okien (kolor czerwony tradycyjne i balkonowe, kolor zielony dachowe)

Tab. 8.2. Zestawienie okien wraz z powierzchnią otwarcia

Symbol	Rodzaj okna	Wymiary (szerokość × wysokość)	Powierzchnia uchylenia jednego skrzydła	Powierzchnia mikrouchyłu jednego skrzydła
Okna wykorzystane do pasywnego chłodzenia				
O1, O2, O3	Tradycyjne, dwuskrzydłowe	120 × 140 cm	0,19 m ²	0,01 m ²
O4, O5	Balkonowe, dwuskrzydłowe	180 × 230 cm	0,32 m ²	0,02 m ²
O6, O7	Tradycyjne, dwuskrzydłowe	180 × 140 cm	0,22 m ²	0,02 m ²
O8, O11, O13, O14, O15	Dachowe, jednoskrzydłowe	78 × 140 cm	0,26 m ²	0,02 m ²
O9	Balkonowe, dwuskrzydłowe	180 × 220 cm	0,31 m ²	0,02 m ²
O12	Balkonowe, trzykrzydłowe	270 × 230 cm	0,32 m ²	0,02 m ²
Okna nieuwzględnione do pasywnego chłodzenia				
O16	Tradycyjne, jednoskrzydłowe	90 × 120 cm	Nie dotyczy	Nie dotyczy
O17, O19	Nieotwieralne (fix)	90 × 180 cm	Nie dotyczy	Nie dotyczy
O18	Nieotwieralne (fix)	120 × 180 cm	Nie dotyczy	Nie dotyczy

Wariant 5: Otwieranie okien przez mieszkańców z prawdopodobieństwem

Przypadek polegał na odwzorowaniu otwierania okien przez mieszkańców z uwzględnieniem prawdopodobieństwa wystąpienia danego zachowania przez mieszkańców. W wariancie 4 założono idealne warunki, w których mieszkańcy zawsze otworzą lub zamkną okno przy spełnieniu opisanych kryteriów. W rzeczywistości mieszkańcy nie są robotami, nie zawsze ich zachowanie będzie zgodne z założeniami, np. pomimo wyższej temperatury zewnętrznej pozostawią otwarte okno. Ten przypadek ma na celu pokazanie jak najbardziej zbliżonego modelu zachowania mieszkańców do rzeczywistości. Przyjęto takie same założenia jak dla wariancie 4 oraz dodatkowo uwzględniono prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia, przy czym:

- Symulacje zostały wykonane dla 25% (W5a), 50% (W5b), 75% (W5c) prawdopodobieństwa;
- W godzinach snu mieszkańców okna zostają w pozycji ustawionej przez mieszkańców przed pójściem spać, w trakcie snu, za wyjątkiem wystąpienia deszczu, pozycja okna nie jest zmieniana;
- W przypadku wystąpienia deszczu okno zostanie zawsze zamknięte;
- Zmiana ustawienia okna może nastąpić po upływie co najmniej godziny bądź okna mogą zostać zamknięte w przypadku opuszczenia domu przez mieszkańców lub przed rozpoczęciem godzin snu.

Wariant 6: Automatyczne otwieranie okien

Przypadek polegał na zaprezentowaniu otwierania okien przez siłowniki sterowane automatycznie z odpowiednim algorytmem w celu obniżenia temperatury w pomieszczeniu. Przyjęto następujące założenia:

- Okna są otwierane, gdy temperatura powietrza zewnętrznego wynosi co najmniej 12°C, temperatura powietrza wewnętrznego jest wyższa od 24°C i wyższa od temperatury powietrza zewnętrznego oraz prędkość wiatru nie może przekraczać 10 m/s;
- Założenia dotyczące okien w łazienkach, konfiguracji otwarcia okien, sytuacji snu, deszczu, nieobecności mieszkańców są takie same jak w wariancie W4;
- W godzinach snu od 22:00 do 6:00 okna na parterze są zamknięte (względy bezpieczeństwa). Natomiast na poddaszu są otwierane. Jedynie w przypadku wystąpienia silnego wiatru (prędkość powyżej 10 m/s) mieszkańcy mogą zamknąć uchylone okna na poddaszu;
- Zmiana ustawienia okna może nastąpić zgodnie z krokiem czasowym symulacji (co 15 minut).

8.1.2 Kryteria oceny warunków środowiska wewnętrznego

Do oceny warunków cieplnych środowiska wewnętrznego jako pierwsze kryterium przyjęto liczbę godzin dyskomfortu cieplnego H_{dys} . Odpowiada ona liczbie godzin, w czasie których symulowana temperatura operatywna powietrza nie mieści się w dopuszczalnym zakresie temperatury komfortu adaptacyjnego dla drugiej kategorii środowiska w badanym pomieszczeniu (patrz Rys. 6.5). Warunki środowiska cieplnego są oceniane tylko w godzinach, w których mieszkańcy przebywali w pomieszczeniu. Ze względu na fakt, że model adaptacyjny ma zastosowanie, jeśli średnia ważona zewnętrznej temperatury przekracza 10°C , to przez większość analizowanego czasu letniego dla rozpatrywanych danych klimatycznych model będzie wskazywał dyskomfort cieplny dla sytuacji przegrzewania pomieszczeń. Mogą zdarzyć się sporadyczne sytuacje, że w okresie letnim w pomieszczeniu będzie za zimno przez nadmierne wychłodzenie budynku. Natomiast okres poza zakresem stosowania modelu adaptacyjnego o temperaturze zewnętrznej niższej niż 10°C nie będzie uwzględniony do oceny warunków komfortu. To kryterium było stosowane jedynie dla przypadków chłodzenia pasywnego. W przypadku chłodzenia mechanicznego założono, że system ten zapewnia warunki komfortu cieplnego w pomieszczeniach.

Jako drugie kryterium oceny środowiska przyjęto liczbę wymian powietrza N w pomieszczeniu. Zgodnie z normą PN-EN 16798-1:2019-06 [47] wielkość strumienia powietrza powinna wynosić $14,4\text{--}36,0\text{ m}^3/\text{h}$ na osobę w zależności od kategorii środowiska wewnętrznego. Na tej podstawie obliczono dla rozpatrywanych pomieszczeń minimalną wartość liczby wymian powietrza, przy czym uwzględniono maksymalną liczbę mieszkańców w danym pomieszczeniu. Natomiast jako graniczną wartość maksymalną liczby wymian powietrza przyjęto 10 h^{-1} . Udział procentowy liczby godzin z liczbą wymian w określonym przedziale wartości powietrza obliczono dla okresu chłodzenia budynku.

Trzecim kryterium oceny było zużycie ciepła $Q_{k,H}$ i chłodu $Q_{k,C}$ (energia końcowa) dla wariantów z rzeczywistym systemem ogrzewania i chłodzenia budynku oraz zapotrzebowania na ciepło Q_H i chłód Q_C (energia użytkowa) dla wariantów z idealnym systemem.

W Tab. 8.3 przedstawiono zestawienie rozpatrywanych wielkości w każdym analizowanym wariantcie obliczeniowym.

Tab. 8.3. Zestawienie analizowanych wyników dla poszczególnych przypadków

Wariant	1a	1b	2a	2b	3	4	5a	5b	5c	6
System idealny	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗
System rzeczywisty	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Zapotrzebowanie na ciepło	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Zapotrzebowanie na chłód	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Zużycie ciepła	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓

Wariant	1a	1b	2a	2b	3	4	5a	5b	5c	6
Zużycie chłodu	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Liczba godzin dyskomfortu	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Liczba wymian powietrza	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Emisja CO ₂ *	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓

* patrz rozdz. 9

8.1.3 Ocena wpływu zastosowania rolet wewnętrznych na oknach na efektywność pasywnego chłodzenia

W pierwszym kroku sprawdzono efektywność zastosowania rolet wewnętrznych dla poprawy warunków cieplnych w pomieszczeniach. W Tab. 8.4 porównano przypadki W1b, W4–W6, w których zastosowano rolety wewnętrzne dla dwóch klimatów: teraźniejszego (TLM2000) i przyszłego (2050) bądź zrezygnowano z rolet.

W budynku bez wietrzenia w klimacie TLM2000 zastosowanie rolet wewnętrznych zmniejszyło wartości H_{dys} o 2 do 5 punktów procentowych w pomieszczeniach na parterze i w sypialni. Natomiast w budynku z wietrzeniem po zastosowaniu rolet wewnętrznych stwierdzono tylko nieznaczny spadek wartości H_{dys} (1 lub 2 punkty procentowe) przy ręcznym (W4) i automatycznym (W6) otwieraniu okien w pokojach 1 i 2. Co więcej, dla przypadku W6 na parterze brak zasłonięcia okien przy prawidłowo ustawionym automatycznym ich otwieraniu spowodował niewielką zmianę wartości H_{dys} z 2 i 1 do 1 i 2 punktów procentowych. Również niższą efektywność systemu z roletami okiennymi odnotowano w przypadkach W5a–W5c.

Natomiast dla klimatu prognozowanego na 2050 rok zastosowanie rolet w budynku bez wietrzenia (W1b) spowodowało spadek liczby godzin dyskomfortu cieplnego tylko o jeden punkt procentowy we wszystkich pomieszczeniach. W wariantach W4 i W6 z otwieraniem okien zaobserwowano spadek H_{dys} o maksymalnie 5 (W4) i 9 punktów procentowych (W6) w pokoju 1, w którym dodatkowo zastosowano rolety wewnętrzne na oknie. W tym pomieszczeniu okna umieszczone są w ścianie południowej i zachodniej, przez co promieniowanie słoneczne w największym stopniu oddziałuje na wewnętrzne warunki cieplne. W pokoju 2 różnice H_{dys} wyniosły od 1 do 4 punktów procentowych. Natomiast w salonie, gabinecie i sypialni odnotowano niewielką poprawę maksymalnie H_{dys} o 2 punkty procentowe lub nawet jej brak (w gabinecie). Gdy uwzględniono ryzyko zachowania się mieszkańców niezgodnie z przyjętymi założeniami (W5a–W5c), lepsze warunki środowiska cieplnego uzyskano przy zastosowaniu jedynie pasywnego chłodzenia powietrzem zewnętrznym (bez rolet). W skrajnym przypadku (w sypialni) różnica H_{dys} wyniosła nawet 15–18 punktów procentowych.

Tab. 8.4. Udział procentowy liczby godzin dyskomfortu cieplnego w danym pomieszczeniu w okresie chłodzenia w zależności od zastosowania dodatkowego zasłonięcia okien

Pom.	Klimat	Rolety	1b	4	5a	5b	5c	6
Salon	TLM2000	Tak	69%	0%	33%	26%	17%	1%
	TLM2000	Nie	74%	0%	30%	24%	15%	0%
	2050	Tak	81%	3%	11%	9%	5%	3%
	2050	Nie	81%	5%	11%	9%	6%	4%
Gabinet	TLM2000	Tak	65%	1%	46%	36%	26%	2%
	TLM2000	Nie	69%	1%	45%	34%	24%	1%
	2050	Tak	80%	2%	13%	10%	6%	4%
	2050	Nie	81%	4%	13%	9%	6%	4%
Sypialnia	TLM2000	Tak	73%	5%	81%	79%	70%	0%
	TLM2000	Nie	75%	5%	77%	77%	64%	0%
	2050	Tak	79%	4%	51%	46%	36%	3%
	2050	Nie	80%	5%	33%	29%	20%	5%
Pokój 1	TLM2000	Tak	91%	15%	64%	61%	51%	5%
	TLM2000	Nie	91%	17%	62%	59%	50%	6%
	2050	Tak	89%	19%	44%	43%	33%	10%
	2050	Nie	90%	24%	39%	36%	32%	19%
Pokój 2	TLM2000	Tak	90%	13%	61%	58%	45%	5%
	TLM2000	Nie	90%	14%	58%	55%	42%	6%
	2050	Tak	89%	15%	42%	38%	30%	9%
	2050	Nie	89%	17%	37%	33%	28%	13%

Biorąc po uwagę uzyskane wyniki, założono, że do dalszych obliczeń rolety wewnętrzne będą odsłonięte przez cały czas, ponieważ ich zasłonięcie nie wpływa znacząco na odczuwanie komfortu cieplnego przez mieszkańców. W niektórych przypadkach stosowanie rolet może spowodować nawet pogorszenie warunków cieplnych i dodatkowo przyczynia się do znacznego zaciemnienia pomieszczeń i potrzeby włączenia sztucznego oświetlenia. Zastosowanie pasywnego chłodzenia tylko powietrzem zewnętrznym (bez rolet) daje zbliżony efekt lub w wariantach W5a–W5c nawet lepszy, szczególnie dla przyszłego klimatu. Jedynie w pokojach 1 i 2 otrzymano widocznie niższe wartości H_{dys} , dlatego w dyskusji wyników w rozdz.10 rozważono ewentualne zasłonięcie okien w tych pomieszczeniach.

8.1.4 Ocena wpływu otwarcia drzwi wewnętrznych na efektywność pasywnego chłodzenia

Porównano wyniki symulacji pod kątem efektywności pasywnego chłodzenia dla zapewnienia warunków komfortu cieplnego w przypadkach, gdy zastosowano wentylację:

- poprzeczną: drzwi wewnętrzne we wszystkich pomieszczeniach były otwarte (za wyjątkiem drzwi do wiatrołapu i garażu);
- jednostronną: drzwi wewnętrzne we wszystkich pomieszczeniach były zamknięte.

W pierwszej kolejności porównano efektywność chłodzenia powietrzem, biorąc pod uwagę liczbę godzin dyskomfortu H_{dys} (Tab. 8.5). Przypadek W1b umieszczono w tabeli jako wariant odniesienia do oceny poprawy warunków w pomieszczeniu. Zauważono, że otwarcie drzwi wewnętrznych wpłynęło korzystnie na warunki panujące w salonie oraz w pokojach 1 i 2 dla przypadków W1b, W4, W6 w klimacie TLM2000 i dla wszystkich przypadków w klimacie przyszłym. W salonie były to różnice 1–6 punktów procentowych dla klimatu TLM2000 i 1–4 punktów procentowych dla klimatu 2050. W pokojach 1 i 2 liczba godzin dyskomfortu spadła w największym stopniu w wariancie W6 odpowiednio o 12 i 16 punktów procentowych (klimat TLM2000) oraz 9 i 8 punktów procentowych (klimat 2050). Natomiast odwrotną sytuację zaobserwowano w przypadku sypialni, gdzie otwarcie drzwi zwiększyło H_{dys} , poza przypadkiem W6 w klimacie TLM2000, w którym H_{dys} zmalało o 1 punkt procentowy. W wariantach W4 i W6 różnice nie były znaczne i wyniosły 3 do 4 punktów procentowych. Dzieje się tak, ponieważ sypialnia jest w najmniejszym stopniu, z rozpatrywanych pomieszczeń na poddaszu, narażona na promieniowanie słoneczne, przez to temperatura powietrza jest tam najniższa. Otwarcie drzwi spowodowało, że strumień ciepła pochodzący z innych pomieszczeń o wyższej temperaturze ogrzewał powietrze w tym pomieszczeniu. W związku z tym, w ramach dyskusji wyników rozważono zamknięcie drzwi w sypialni (rozdz. 10). W przypadku gabinetu zamknięcie drzwi nie pogorszyło ani nie poprawiło znacząco warunków cieplnych w przypadkach W1b, W4 i W6. Jedynie dla klimatu TLM2000 w wariancie W4 otrzymano mniejszą wartość H_{dys} (o 1 punkt procentowy) przy zamkniętych drzwiach. Przy uwzględnionym prawdopodobieństwie (W5a–W5c) na ogół korzystniejsze wyniki uzyskano przy zamkniętych drzwiach dla klimatu TLM2000, a dla klimatu 2050 przy otwartych, za wyjątkiem gabinetu i sypialni, gdzie zamknięcie drzwi spowodowało spadek H_{dys} o maksymalnie 4 i 20 punkty procentowe. Zazwyczaj warunki cieplne bez zastosowania pasywnego chłodzenia w pomieszczeniach (wariant W1b) były lepsze przy otwartych drzwiach, poza sypialnią i gabinetem, co się pokrywa z wynikami uzyskanymi dla wariantów z otwieraniem okien W4–W6.

W drugim kroku porównano liczbę wymian powietrza w pomieszczeniach przy wentylacji jednostronnej i poprzecznej. W Tab. 8.6 przedstawiono udział procentowy czasu w okresie chłodzenia, gdy w pomieszczeniach liczba wymian była niższa niż zalecana dla II kategorii środowiska wewnętrznego. Przy zamkniętych oknach (W1b) podobnie jak w trakcie pomiarów (rozdz. 5.3.3) nie uzyskano minimalnej wymiany powietrza dla II kategorii. Przy ręcznym otwieraniu okien w większości pomieszczeń niezależnie od klimatu i otwarcia drzwi przez większość czasu minimalna wymiana powietrza nie była zapewniona; czas ten wynosił od 46% do nawet 96%. Nieznacznie lepsze wyniki uzyskano przy automatycznym otwarciu okien, zmniejszając maksymalnie czas ze zbyt niską wymianą powietrza o 14 punktów procentowych. Dla przypadków W4 i W6 przy zamkniętych drzwiach uzyskiwano lepszą wymianę powietrza. W przypadkach z prawdopodobieństwem (W5a–

W5c), szczególnie dla przypadku W5a, czas ze zbyt niską wymianą powietrza był krótszy. Przyczyną tego jest częstsze otwieranie okien niż wynikające z założeń, które poprawiło warunki pod względem wymiany powietrza, ale równocześnie zwiększało liczbę godzin dyskomfortu (Tab. 8.6). W tych przypadkach nie zaobserwowano zależności na korzyść zamkniętych drzwi, wręcz uzyskano korzystniejsze wyniki przy otwartych drzwiach np. pokoju 2, rzędu nawet 14%.

Tab. 8.5. Udział procentowy liczby godzin dyskomfortu cieplnego w danym pomieszczeniu w okresie chłodzenia przy otwartych i zamkniętych drzwiach

Pom.	Klimat	Drzwi otwarte	1b	4	5a	5b	5c	6
Salon	TLM2000	Tak	74%	0%	30%	24%	15%	0%
	TLM2000	Nie	80%	1%	20%	13%	6%	1%
	2050	Tak	82%	7%	16%	12%	9%	6%
	2050	Nie	83%	8%	20%	14%	11%	7%
Gabinet	TLM2000	Tak	69%	1%	45%	34%	24%	1%
	TLM2000	Nie	66%	0%	20%	16%	9%	1%
	2050	Tak	81%	4%	15%	12%	7%	4%
	2050	Nie	82%	4%	11%	7%	5%	4%
Sypialnia	TLM2000	Tak	75%	5%	77%	77%	64%	0%
	TLM2000	Nie	39%	1%	64%	63%	51%	1%
	2050	Tak	80%	5%	48%	43%	30%	3%
	2050	Nie	70%	2%	28%	24%	17%	0%
Pokój 1	TLM2000	Tak	91%	17%	62%	59%	50%	6%
	TLM2000	Nie	94%	28%	60%	52%	41%	19%
	2050	Tak	90%	21%	45%	41%	36%	13%
	2050	Nie	96%	30%	54%	45%	38%	22%
Pokój 2	TLM2000	Tak	90%	14%	58%	55%	42%	6%
	TLM2000	Nie	93%	23%	36%	31%	25%	22%
	2050	Tak	90%	17%	42%	38%	32%	11%
	2050	Nie	93%	24%	45%	34%	34%	19%

Tab. 8.6. Udział procentowy liczby godzin z liczbą wymian powietrza poniżej minimalnej wartości dla II kategorii środowiska wewnętrznego

Pom.	Klimat	Drzwi otwarte	N_{min} dla II kat.	1b	4	5a	5b	5c	6
Salon	TLM2000	Tak	0,7 h ^{-1***}	100%	81%	63%	67%	73%	78%
	TLM2000	Nie		100%	78%	64%	67%	71%	75%
	2050	Tak		100%	70%	67%	68%	69%	65%
	2050	Nie		100%	67%	70%	67%	67%	62%
Gabinet	TLM2000	Tak	0,7 h ^{-1*}	100%	88%	65%	70%	76%	84%
	TLM2000	Nie		100%	88%	65%	69%	76%	85%
	2050	Tak		100%	79%	69%	70%	74%	72%
	2050	Nie		100%	78%	69%	69%	72%	70%
Sypialnia	TLM2000	Tak	0,9 h ^{-1**}	100%	96%	49%	54%	63%	91%
	TLM2000	Nie		100%	95%	48%	54%	64%	89%
	2050	Tak		100%	82%	50%	53%	61%	70%
	2050	Nie		100%	70%	54%	55%	60%	63%
Pokój 1	TLM2000	Tak	0,5 h ^{-1*}	100%	68%	16%	20%	32%	59%
	TLM2000	Nie		100%	61%	16%	19%	29%	55%
	2050	Tak		100%	54%	24%	26%	32%	40%
	2050	Nie		100%	54%	24%	26%	32%	40%
Pokój 2	TLM2000	Tak	0,7 h ^{-1*}	100%	73%	38%	43%	54%	73%
	TLM2000	Nie		100%	62%	43%	46%	50%	60%
	2050	Tak		100%	62%	39%	40%	46%	51%
	2050	Nie		100%	45%	53%	45%	46%	40%

* Liczba wymian obliczona dla jednej osoby w pomieszczeniu

** Liczba wymian obliczona dla dwóch osób w pomieszczeniu

*** Liczba wymian obliczona dla czterech osób w pomieszczeniu

W trzecim kroku sprawdzono, przez jaką część okresu chłodzenia występowała wymiana powietrza zwiększająca ryzyko powstania przeciągu (większa niż 10 h⁻¹). Wyniki zaprezentowano w Tab. 8.7. Zgodnie z oczekiwaniami w wariantach z otwartymi drzwiami czas występowania wymiany powietrza powyżej 10 h⁻¹ był dłuższy lub taki sam jak przy zamkniętych drzwiach. Najbardziej widoczne było to w pokoju 2, gdzie czas ten wzrósł o 9 (W4), 17 (W5a), 15 (W5b), 11 (W5c) i 8 (W6) punktów procentowych. W pozostałych pomieszczeniach różnice nie przekraczały 6 punktów procentowych. Co zaskakujące, w pokoju 1 liczba wymian powyżej 10 h⁻¹ wystąpiła częściej przy zamkniętych drzwiach.

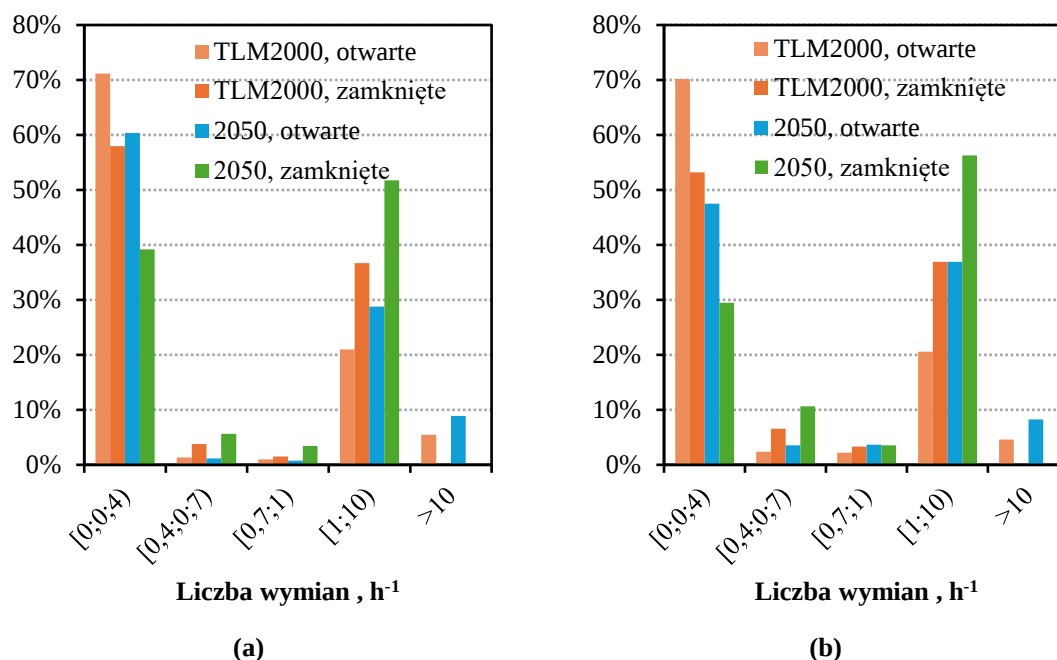
Tab. 8.7 Udział procentowy liczby godzin z liczbą wymian powietrza powyżej 10 h⁻¹ w danym pomieszczeniu w okresie chłodzenia przy otwartych i zamkniętych drzwiach

Pom.	Klimat	Drzwi otwarte	4	5a	5b	5c	6
Salon	TLM2000	Tak	3%	9%	7%	4%	2%
	TLM2000	Nie	2%	6%	4%	3%	2%
	2050	Tak	4%	7%	6%	5%	3%
	2050	Nie	2%	4%	3%	3%	2%
Gabinet	TLM2000	Tak	2%	6%	5%	4%	2%
	TLM2000	Nie	0%	0%	0%	0%	0%
	2050	Tak	2%	5%	4%	3%	2%
	2050	Nie	0%	0%	0%	0%	0%
Sypialnia	TLM2000	Tak	0%	4%	3%	2%	0%
	TLM2000	Nie	0%	0%	0%	0%	0%
	2050	Tak	1%	3%	2%	2%	1%
	2050	Nie	0%	0%	0%	0%	0%
Pokój 1	TLM2000	Tak	12%	19%	15%	12%	6%
	TLM2000	Nie	15%	19%	17%	15%	10%
	2050	Tak	14%	13%	12%	12%	7%
	2050	Nie	17%	13%	13%	12%	11%
Pokój 2	TLM2000	Tak	5%	15%	12%	10%	5%
	TLM2000	Nie	0%	0%	0%	0%	0%
	2050	Tak	9%	17%	15%	11%	8%
	2050	Nie	0%	0%	0%	0%	0%

Dodatkowo przedstawiono bardziej szczegółowe wyniki wymiany powietrza w pokoju 2, w którym były prowadzone również badania CFD. Na Rys. 8.3 pokazano udział procentowy czasu występowania wymian powietrza w zakresie spełniającym minimalną wartość dla poszczególnych kategorii środowiska wewnętrznego: 0,4 h⁻¹ (kategoria III), 0,7 h⁻¹ (kategoria II) i 1,0 h⁻¹ (kategoria I). Zaprezentowano wyniki dla przypadku W4 i W6 w okresie chłodzenia. Niestety przez większość czasu zarówno przy otwartych, jak i zamkniętych drzwiach w klimacie TLM2000 wymiana powietrza nie spełniała wymagań nawet III kategorii środowiska. W przypadku W4 było to granicach 70±1% przy otwartych drzwiach i 55±3% przy zamkniętych. W klimacie przyszłym uzyskano wymianę powietrza spełniającą wymagania I kategorii przez więcej niż połowę czasu chłodzenia: 52% (przypadek W4) i 56% (przypadek W6) przy zamkniętych drzwiach, natomiast przy otwartych 29% (przypadek W4) i 37% (przypadek W6). Wymiana powietrza o wartości powyżej 10 h⁻¹ wystąpiła jedynie przy otwartych drzwiach przez 9% i 8% czasu. Podsumowując, można stwierdzić, że lepsze warunki środowiska wewnętrznego pod kątem

wymiany powietrza w pomieszczeniu uzyskano przy zamkniętych drzwiach oraz w przyszłym klimacie.

Poza sprawdzeniem warunków środowiska w ujęciu globalnym (wymiany powietrza i liczby godzin dyskomfortu) komfort cieplny należy także ocenić ujęciu lokalnym, co zostało omówione w rozdz. 8.2.5 prezentującym wyniki prognozowania numerycznego CFD.



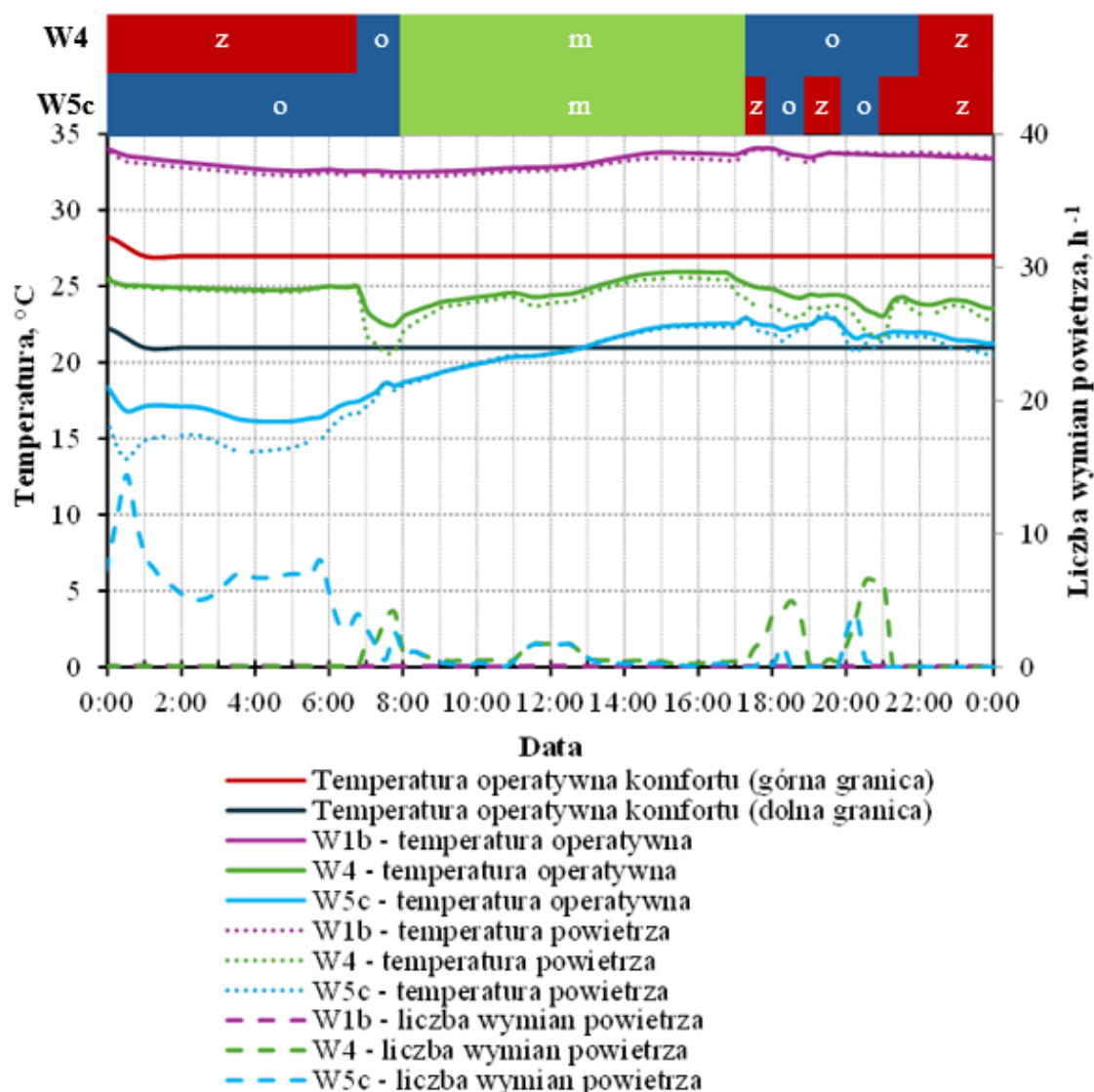
Rys. 8.3. Udział procentowy liczby wymian powietrza w danym przedziale w pokoju 2: (a) W4, (b) W6

8.1.5 Ocena wpływu zachowania mieszkańców na efektywność pasywnego chłodzenia

Celem kolejnego etapu badań było pokazanie, jak zachowanie mieszkańców, niezgodne z założonymi kryteriami, wpływa na warunki cieplne i wymianę powietrza w budynku. Na Rys. 8.4 przedstawiono porównanie dobowego (22 lipca) przebiegu temperatury operatywnej i wymiany powietrza w pokoju 2 (drzwi wewnętrzne otwarte) dla klimatu TLM2000 dla trzech przypadków: mieszkańcy otwierali okna w 100% zgodnie z założonym schematem (W4), z 75% prawdopodobieństwem (W5c) oraz okna były zamknięte cały czas (W1b). Ze względów na czytelność wykresu wybrano tylko jeden przypadek z prawdopodobieństwem (W5c), który był najkorzystniejszy z punktu widzenia efektywności pasywnego chłodzenia. Na wykresie zaznaczono granice temperatury operatywnej dla II kategorii środowiska. Wybrano takie dni, w których wystąpiły różnice w zachowaniu mieszkańców pomiędzy prawdopodobieństwem 100% i 75% w celu pokazania konsekwencji niewłaściwego otwierania okien przez mieszkańców. Jak można zauważyć, w przypadku nieotwarcia okna przez całą dobę (W1b) w pomieszczeniu występowały warunki powodujące dyskomfort mieszkańców, temperatura operatywna utrzymywała w granicach $33 \pm 1,1^\circ\text{C}$ przez całą dobę. Porównując przypadki W4 i W5c, zaobserwowano widoczne różnice w przebiegu temperatury operatywnej w ciągu doby. W przypadku W4 przebieg temperatury operatywnej mieścił przez cały czas w zakresie

komfortu cieplnego adaptacyjnego. Natomiast w przypadku W5c zaobserwowano spadek tej temperatury poza dolny zakres: w godzinach nocnych, kiedy zgodnie z przyjętymi kryteriami (rozdz. 8.1.1) okno powinno być zamknięte, a pozostawiono je otwarte. W czasie nieobecności ludzi w obydwu wariantach okno pozostawiono w pozycji mikrouchyłu. Po godzinie 17:00 zaobserwowano przesunięcie w czasie zachowania mieszkańców zgodnego z oczekiwaniem w przypadku W5c; otworzyli okno pół godziny później niż powinni, następnie zamknęli i znowu otworzyli. W tym okresie w wariantcie W4 okno było cały czas otwarte. W obydwu przypadkach (W4 i W5c) otwarcie okna powodowało wzrost wymiany powietrza w pomieszczeniu powyżej 6 h^{-1} , a w godzinach nocnych nawet 14 h^{-1} . Na ogół zachowanie mieszkańców niezgodne z założonymi kryteriami (warianty 5a–5c) powodowało wzrost czasu, gdy w pomieszczeniach była duża wymiana powietrza, większa niż 10 h^{-1} , powodująca znaczne ryzyko powstania przeciągu w porównaniu z założonym schematem otwierania okna (W4). Największe różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi dla przypadku W4 a poszczególnych przypadków W5a–W5c zaobserwowano w klimacie TLM2000 w pokoju 2 i wyniosły między 5 a 10 punktów procentowych. Jedynie w pokoju 1 w klimacie ocieplonym liczba wymian częściej przekraczała 10 h^{-1} w wariantcie W4 (Tab. 8.7). Z kolei z powodu częstszego otwierania okna, szczególnie pozostawiania go otwartego na godziny nocne, uzyskano liczbę wymian spełniającą wymagane kryteria w wariantach W5a–W5c (Tab. 8.6).

Na podstawie wyników przedstawionych w Tab. 8.5 w przypadku z ręcznego otwierania okien (W4) na parterze oraz w sypialni przez niemal cały okres pasywnego chłodzenia były zachowane warunki zapewniające komfort cieplny. Natomiast w pokojach 1 i 2 okres z dyskomfortem mieszkańców wyniósł maksymalnie 14% i 30% czasu. Wprowadzenie losowości w otwieraniu okien, czyli zachowania mieszkańców *de facto* bardziej zbliżonego do rzeczywistości, spowodowało zdecydowany spadek efektywności pasywnego chłodzenia. Różnice w otrzymanym czasie dyskomfortu w zależności od prawdopodobieństwa wynosiły nawet do 21 punktów procentowych i w porównaniu z różnicą (maksymalnie do 59 punktów procentowych) między W4 i W5c były zdecydowanie mniejsze.



Rys. 8.4. Przebieg zmienności temperatury operatywnej, powietrza wewnętrznego i liczby wymian powietrza w pokoju nr 2 w dniu 22 lipca wraz z zaznaczoną pozycją otwarcia okna: zamkniętą „z” (kolor czerwony), mikrouchyłu „m” (kolor zielony), otwartą „o” (kolor niebieski)

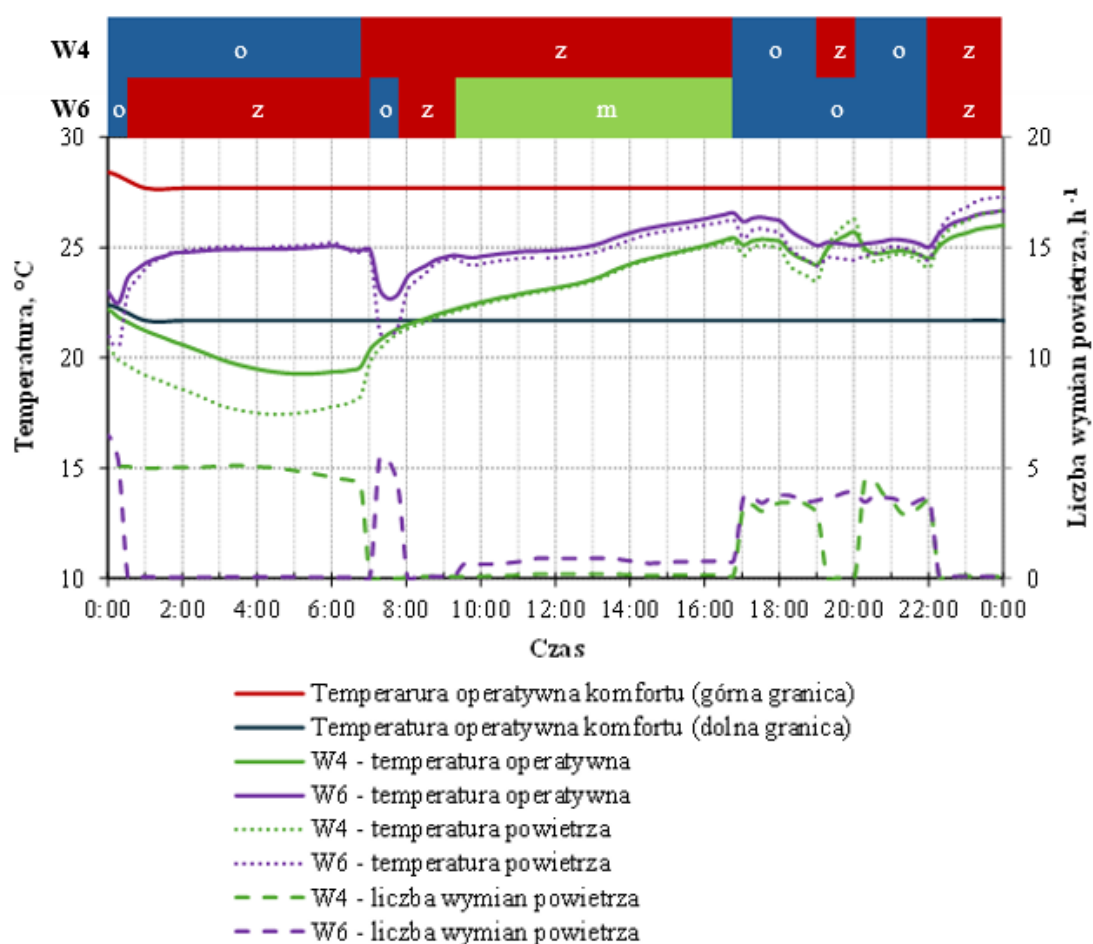
8.1.6 Porównanie ręcznego i automatycznego otwierania okien

Porównano ze sobą dwa sposoby sterowania otwarciem okien: ręczne i automatyczne. Ze względu na to, że część wyników zaprezentowano w rozdz. 8.1.4, w tej części skupiono się na pokazaniu odmienności działania obydwu systemów i konsekwencji z nich płynących. Główne różnice pomiędzy ręcznym a automatycznym otwieraniem okien wg kryteriów przyjętych w rozdz. 8.1.1 polegają na tym, że przy manualnym sterowaniu w niniejszej pracy zachowanie mieszkańców zostało symulowane na podstawie odczuć cieplnych według modelu adaptacyjnego, a w przypadku automatycznego zasymulowano system sterowania składający się z siłowników i czujników temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, które są najczęściej stosowane w praktyce. Co za tym idzie, decyzja o otwarciu lub zamknięciu okna przez mieszkańców została oparta m.in. o wynik optymalnej temperatury komfortu adaptacyjnego, a w przypadku sterowania automatycznego – temperatury powietrza wewnętrznego. Drugą różnicą jest to, że

siłowniki umożliwiają zmianę konfiguracji otwarcia okna w godzinach snu na poddaszu. Dodatkowo przyjęto, że mieszkańcy nie będą częściej niż co godzinę zmieniać otwarcia okna, a przy siłownikach założono zmianę 15 minutowym krokiem czasowym. Takie odmienne podejścia mogą powodować różnice w uzyskanych wynikach symulacyjnych, ale jednocześnie odzwierciedlają rzeczywiste użytkowanie budynku.

Na rysunkach Rys. 8.5–8.7 przedstawiono porównanie dobowych przebiegów temperatury operatywnej dla przypadków z ręcznym (W4) i automatycznym otwieraniem okien (W6). Zaprezentowano przypadki, gdy:

- (a) automatyzacja otwierania okna zapobiegła nadmiernemu wychłodzeniu pomieszczenia w godzinach nocnych przy jednoczesnym zapewnieniu warunków środowiska cieplnego w granicach II kategorii w pozostałej części dnia (Rys. 8.5);
- (b) nadmierne wychłodzenie pomieszczenia przez mieszkańców w godzinach nocnych wpłynęło korzystnie na warunki środowiska cieplnego w ciągu dnia (Rys. 8.6);
- (c) automatyzacja otwierania okna nie wpłynęła znacząco na poprawę warunków środowiska cieplnego (Rys. 8.7).



Rys. 8.5. Przebieg zmienności temperatury operatywnej i liczby wymian powietrza w pokoju 2 w dniu 26 sierpnia wraz z zaznaczoną pozycją otwarcia okna: zamkniętą „z” (kolor czerwony), mikrouchyłu „m” (kolor zielony), otwartą „o” (kolor niebieski)

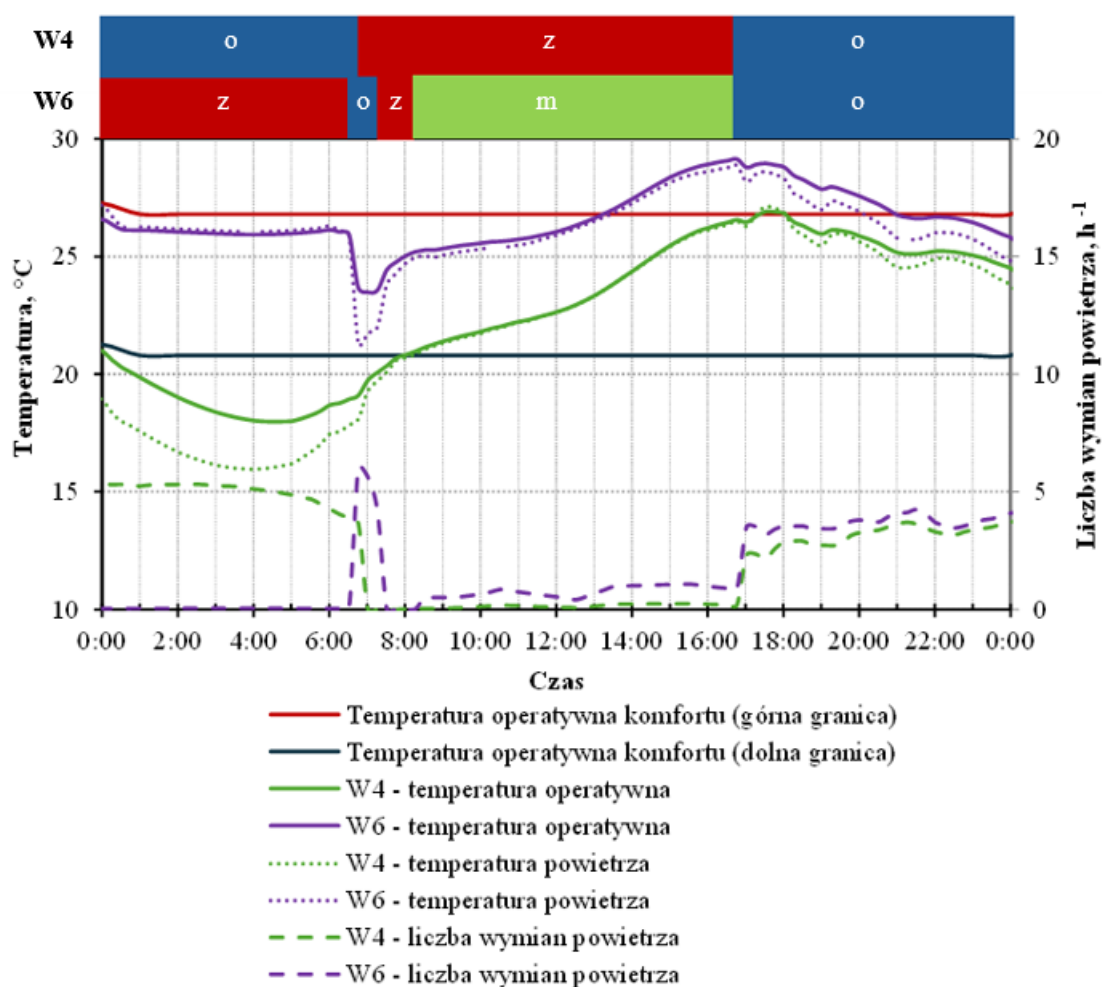
W przypadku (a) przebieg temperatury operatywnej powietrza przy automatycznym otwieraniu okna przez całą dobę mieścił się w granicach II kategorii środowiska wewnętrznego, a przy ręcznym otwieraniu okien temperatura operatywna powietrza była za niska w okresie nocnym (Rys. 8.5). Różnice są spowodowane tym, że zgodnie z przyjętymi kryteriami mieszkańcy w godzinach nocnych nie zmieniają ustawienia otwarcia okna bez wyraźnej przyczyny (silnego wiatru), a w wariancie z automatycznym otwieraniem okien jest taka możliwość. Jest to widoczne na przebiegu, gdy o godzinie 0:30 siłowniki zamknęły okno, ponieważ temperatura powietrza zewnętrznego spadła poniżej 12°C. Natomiast w pozostałej części dnia oba porównywane systemy zapewniły optymalne warunki środowiska, a występujące różnice w konfiguracjach otwarcia okna nie wpłynęły znacząco na przebieg temperatury operatywnej.

W przypadku (b) przebiegi temperatury operatywnej powietrza przekraczały zakresy II kategorii środowiska w obu przypadkach (Rys. 8.6). W godzinach nocnych system automatyczny, zamykając okno, zapobiegł nadmiernemu wychłodzeniu pomieszczenia przez powietrze zewnętrzne o temperaturze niższej niż 12°C. Następnie w godzinach porannych, przed opuszczeniem budynku przez mieszkańców, okno zostało otwarte. Ze względu na stosunkowo krótki czas chłodzenia pomieszczenia (1h i 15 min.) nie udało się obniżyć temperatury do dolnej granicy II kategorii środowiska, zapewniając odpowiednio duży margines wzrostu temperatury do górnej granicy. To w konsekwencji spowodowało, że przez ponad 8 godzin temperatura operatywna przekraczała dopuszczalną granicę II kategorii środowiska. Przy ręcznym systemie okno było otwarte przez całą noc, powodując znaczne obniżenie temperatury poniżej dopuszczalnej granicy. Jednak ta niepożądana sytuacja w kolejnych godzinach przyniosła pozytywny skutek, utrzymując przez prawie cały czas warunki II kategorii środowiska. Co więcej, uzyskane w godzinach nocnych warunki nie były skrajnie niekorzystne dla mieszkańców, ponieważ minimalna temperatura operatywna wyniosła około 18°C, co nie powinno znacząco wpłynąć na ich odczucie komfortu.

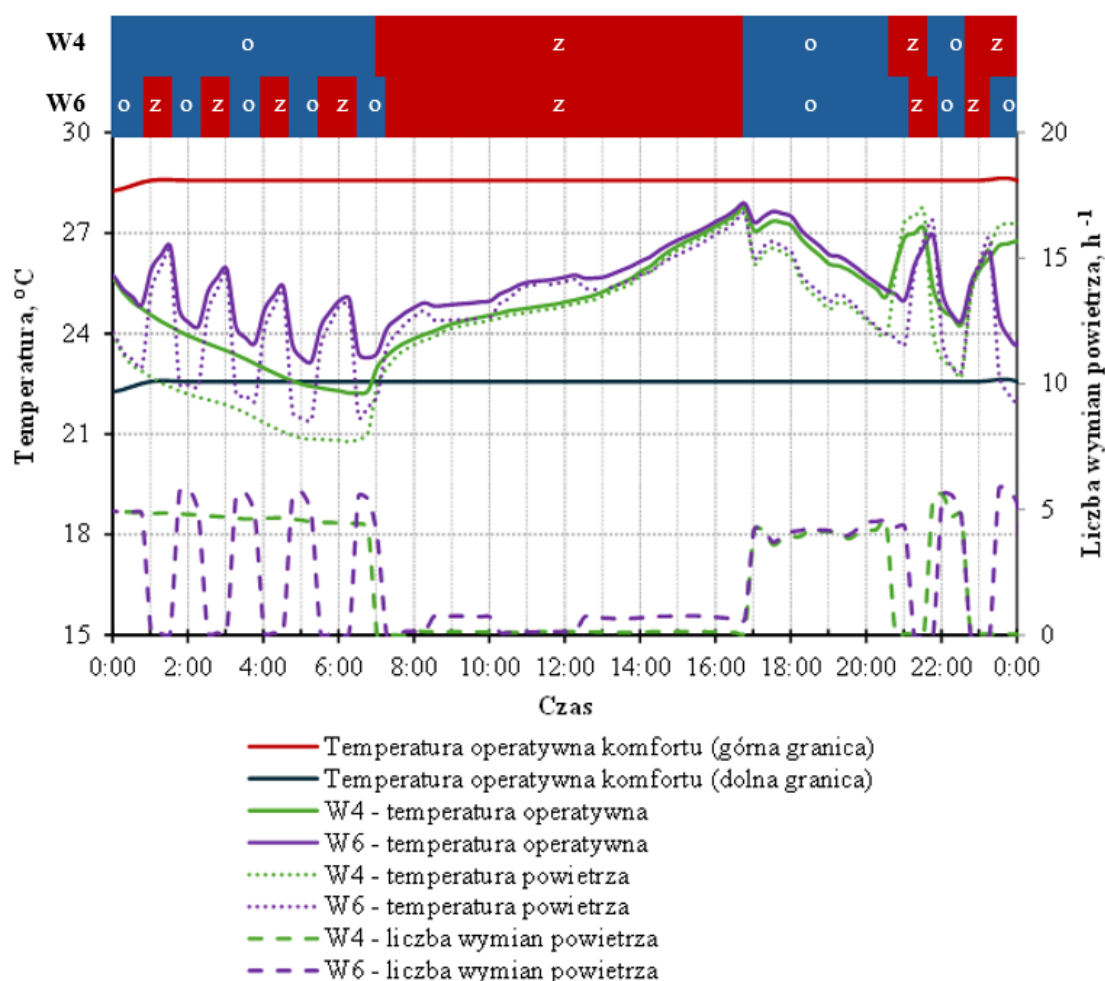
Trzecią wyróżnioną sytuacją jest przypadek (c), gdy w godzinach nocnych temperatura powietrza wewnętrznego po otwarciu okna spadała poniżej temperatury granicznej 24°C do około 21°C, co spowodowało zamknięcie okna i wzrost temperatury powyżej 24°C – w następstwie ponowne otwarcia okna wraz ze spadkiem (Rys. 8.7). Taka sytuacja powtórzyła się 4-krotnie. W porównaniu z systemem ręcznym, kiedy przez całą noc okno było otwarte, uzyskano minimalnie wyższą temperaturę w pomieszczeniu, ale nie wpłynęło to w istotny sposób na pozostały przebieg temperatury operatywnej powietrza w ciągu dnia. Jedynie w nieznacznym stopniu działanie to zapobiegło nadmiernemu wychłodzeniu pomiędzy godziną 5:00 a 7:00 o 0,3°C poniżej dolnej granicy.

Pod względem zapewnienia jak najniższej wartości H_{dys} wyniki wskazują na system automatyczny zarówno w klimacie TLM2000 i prognozowanym na 2050 rok (Tab. 8.5). W przypadku pomieszczeń: salonu, gabinetu i sypialni różnice pomiędzy przypadkami W4 i W6 były niewielkie – wynosiły maksymalnie 5 punktów procentowych, natomiast największe rozbieżności wystąpiły w pokoju 1 i 2 – do 10 punktów procentowych. W przypadkach z prawdopodobieństwem różnice są zdecydowanie bardziej wyraźne,

szczególnie na poddaszu do nawet 77 punktów procentowych. Porównując wyniki uzyskane przy tej samej konfiguracji drzwi (zamkniętych lub otwartych), można zauważyć, że różnice w wartościach H_{dys} pomiędzy systemem ręcznym (przypadki W4–5c) a automatycznym (przypadek W6) były zazwyczaj mniejsze w klimacie 2050 niż w teraźniejszym o nawet 53 punkty procentowe (różnica między przypadkiem W5b a W6 w sypialni przy otwartych drzwiach). Wyjątek stanowią warianty z zamkniętymi drzwiami dla przypadku W4 w salonie, sypialni i pokoju 2 oraz pozostałe przypadki W5a–W5c również w pokoju 2.



Rys. 8.6. Przebieg zmienności temperatury operatywnej, powietrza wewnętrznego i liczby wymian powietrza w pokoju nr 2 w dniu 18 czerwca wraz z zaznaczoną pozycją otwarcia okna: zamkniętą „z” (kolor czerwony), mikrouchyłu „m” (kolor zielony), otwartą „o” (kolor niebieski)



Rys. 8.7. Przebieg zmienności temperatury operatywnej, powietrza wewnętrznego i liczby wymian powietrza w pokoju nr 2 w dniu 8 sierpnia wraz z zaznaczoną pozycją otwarcia okna: zamkniętą „z” (kolor czerwony), mikrouchyłu „m” (kolor zielony), otwartą „o” (kolor niebieski)

8.1.7 Ocena zużycia energii w budynku na potrzeby ogrzewania, chłodzenia i wentylacji

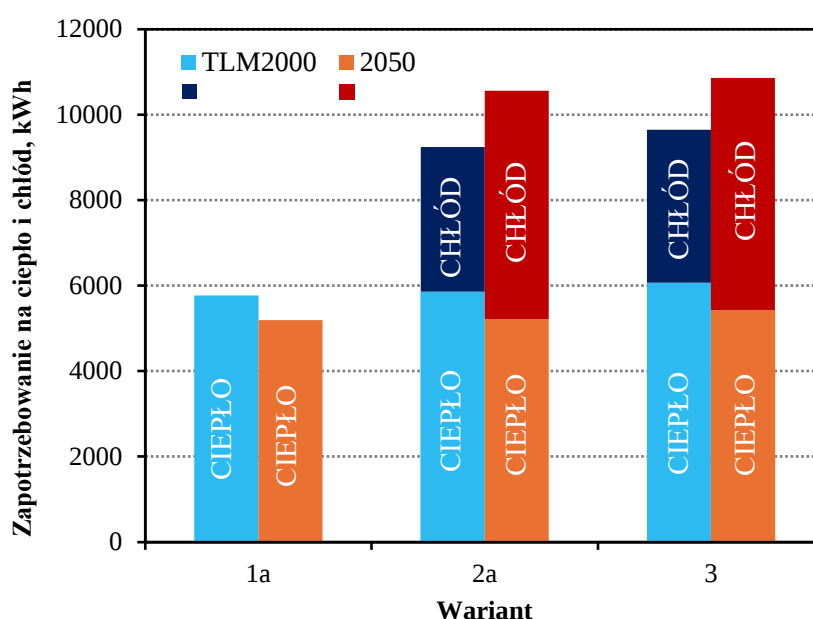
Zapotrzebowanie na ciepło i chłód budynku

W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę zapotrzebowania na ciepło i chłód budynku, czyli energii z pominięciem sprawności systemów HVAC i źródeł ciepła (energia użytkowa).

Na Rys. 8.8 przedstawiono roczne zapotrzebowanie na ciepło i chłód dla systemów idealnych (W1a, W2a, W3). Przypadek W1a to przypadek teoretyczny bez otwierania okien oraz bez chłodzenia. Tu zapotrzebowanie na ciepło jest najmniejsze, jednak ten przypadek nie zapewnia warunków komfortu cieplnego. Liczba godzin dyskomfortu cieplnego dla obecnego klimatu standardowego stanowi od 68% do 90% okresu chłodniczego w zależności od pomieszczenia (w klimacie przyszłym jest to 80–90%). Włączenie systemu mechanicznego chłodzenia do zadanej temperatury powietrza 24°C powoduje wzrost zapotrzebowania na ciepło o 93 kWh w klimacie obecnym i o 26 kWh w klimacie przyszłym, jednocześnie pojawia się zapotrzebowanie na chłód stanowiące

58% zapotrzebowania na ciepło w klimacie TLM2000. W klimacie 2050 zapotrzebowanie na chłód jest praktycznie takie samo (różni się o 2%) jak zapotrzebowanie na ciepło.

Ciekawym przypadkiem jest W3, kiedy system chłodzenia dokładnie utrzymuje w pomieszczeniach komfortową temperaturę operatywną wynikającą z modelu adaptacyjnego. Pozostaje zatem w sferze teoretycznych rozważań, ile energii należałoby doprowadzić do budynku, aby w każdym momencie zapewnić komfort wynikający z modelu adaptacyjnego ($H_{dis}=0$). W tym systemie wystąpiły większe wartości zapotrzebowania na ciepło i chłód w porównaniu z pozostałymi przypadkami W1a i W2a. Zapotrzebowanie na ciepło w przypadku W3 było wyższe o 209 kWh w klimacie TLM2000 i 206 kWh w klimacie przyszłym niż w przypadku W2a z chłodzeniem do zadanej temperatury nastawy 24°C, co stanowiło 4% wzrost. Natomiast zapotrzebowanie na chłód wzrosło o 193 kWh (6%) w klimacie obecnym oraz 89 kWh (2%) w klimacie ocieplonym. Porównując system chłodzący do komfortowej temperatury operatywnej z przypadkiem bez mechanicznego chłodzenia, można zauważyć, że zapotrzebowanie na ciepło było wyższe o 302 kWh w klimacie TLM2000 i o 232 kWh w klimacie prognozowanym, co odpowiada wzrostowi o 5,2 % oraz 4,5%. Ze względu na pojawienie się także zapotrzebowania na chłód w przypadku W3, energii do budynku należałoby doprowadzić o 40% (klimat TLM2000) i 52% więcej (klimat 2050) niż w systemie bez chłodzenia oraz o 4% i 3% więcej niż w systemie W2a.

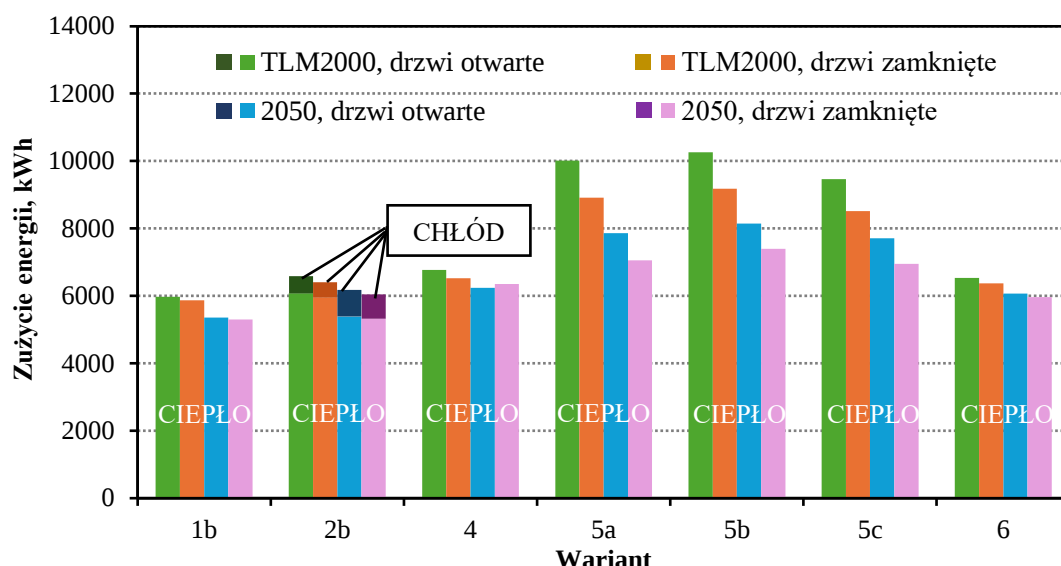


Rys. 8.8. Roczne zapotrzebowanie na ciepło i chłód

Zużycie energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia

Wykorzystanie naturalnego chłodu powietrza zewnętrznego wiąże się również z negatywnymi konsekwencjami w postaci wzrostu zużycia energii na ogrzewanie (w tym podgrzanie powietrza wentylacyjnego). Taka sytuacja ma miejsce w okresie przejściowym, kiedy system ogrzewania jest uruchomiony, a jednocześnie zachodzi potrzeba chłodzenia budynku w wybranych godzinach. Otwarcie okien w tym okresie może powodować

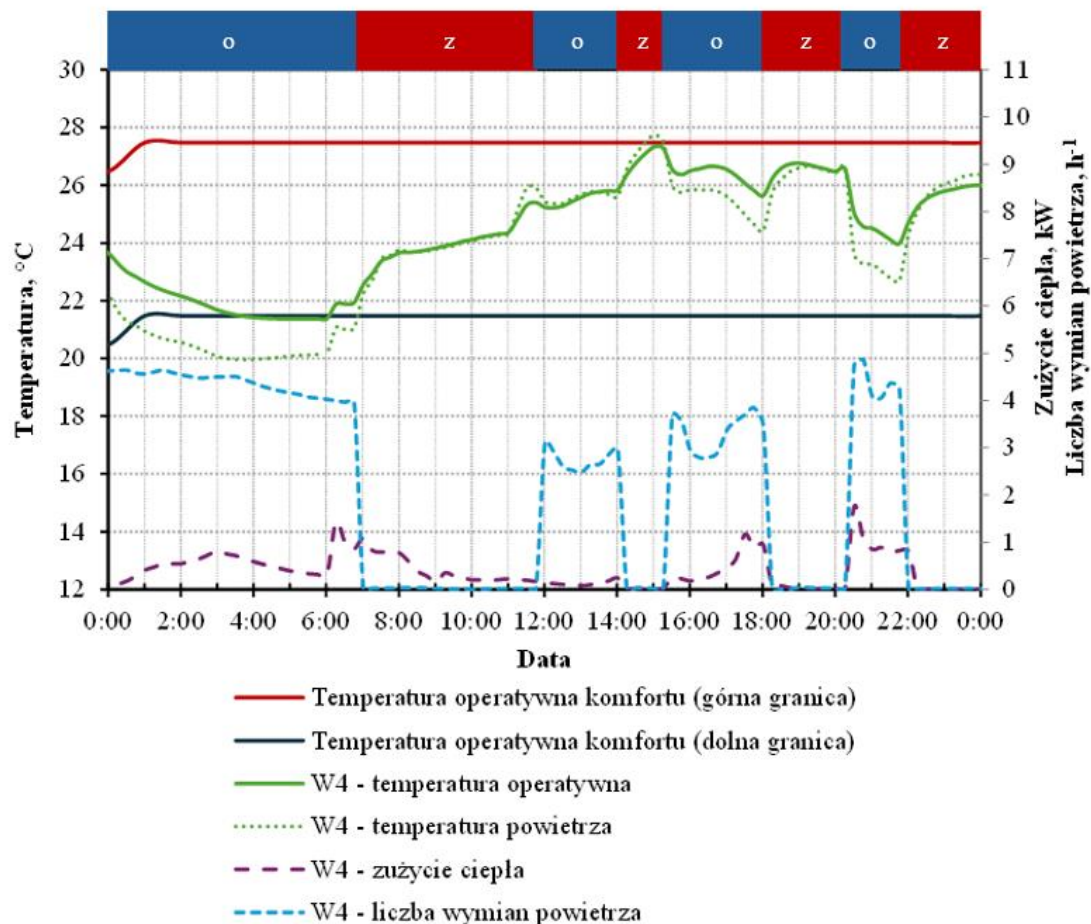
większe straty ciepła na wentylację niż w sytuacji z oknami zamkniętymi. Na Rys. 8.9 przedstawiono porównanie rocznego zużycia ciepła dla wariantów z rzeczywistym systemem ogrzewania oraz dodatkowo chłodu dla przypadku z mechanicznym chłodzeniem (wariant W2b). Jako źródło ciepła przyjęto kocioł gazowy. W klimacie TLM2000 wartości zużycia ciepła wahały się od 5871 kWh do 10263 kWh, a w klimacie przyszłym od 5302 kWh do 8140 kWh. Najmniejsze wartości zużycia ciepła wystąpiły w wariantach z zamkniętymi oknami, a największe w wariantach z prawdopodobieństwem i były one niemal dwukrotnie większe niż w wariantach z zamkniętymi oknami. Najmniejszy wzrost zużycia ciepła, porównując z wariantem W1b, wystąpił dla wariantu W2b: w klimacie obecnym wyniósł 77 kWh, a w przyszłym tylko 20 kWh (w obu przypadkach przy zamkniętych drzwiach wewnętrznych). Natomiast wśród wariantów z pasywnym chłodzeniem najmniejszy przyrost wystąpił dla przypadku z automatycznym otwieraniem okien i wyniósł od 500 kWh do 706 kWh. Największe wartości przyrostu uzyskano dla wariantu W5b wynoszące od 2092 kWh do 4288 kWh z powodu częstego występowania otwierania okien niezgodnego z przyjętymi założeniami powodującego znaczne wychłodzenie pomieszczeń, szczególnie w okresach nocnych. Z punktu widzenia zużycia energii na ogrzewanie korzystniej wypada budynek z systemem chłodzenia mechanicznego, ponieważ system mechaniczny charakteryzuje się mniejszą bezwładnością niż system pasywny. Pozwala on na lepsze i bardziej efektywne sterowanie, nie powodując przy tym dużych strat ciepła w okresach przejściowych. Jednak, biorąc pod uwagę całkowite zużycie energii (zarówno na ogrzewanie, jak i chłodzenie), budynek z systemem chłodzenia mechanicznego wypada gorzej niż budynek z automatycznym otwieraniem okien (wariant W6), jednak lepiej niż budynek z pozostałymi systemami pasywnymi (warianty W4 i W5a–W5c). Otwarcie drzwi wewnętrznych w budynku spowodowało wzrost zużycia ciepła we wszystkich wariantach (poza wariantem W4 dla klimatu 2050) i chłodu w wariantach W2b. Powodem tego są większe straty ciepła pochodzące z nieogrzewanych przestrzeni w budynku (holu i schodów). W wariantach W1b, W2b, W4, W6 wzrost był niewielki w skali roku i wyniósł tylko od 52 kWh do 247 kWh, co odpowiada zwiększeniu zużycia ciepła od 1% do 4% w porównaniu z zużyciem przy zamkniętych drzwiach. Natomiast w wariantach W5a–W5c otwarcie drzwi wewnętrznych wygenerowało znaczny wzrost potrzeb cieplnych budynku od 746 kWh do 1106 kWh, czyli o 10% do 12%. Co ciekawe, w wariantach 4 dla klimatu prognozowanego ocieplonego niższą o 2% wartość zużycia ciepła uzyskano przy otwartych drzwiach, a w wariantach W6 odwrotnie: niższą wartość o 2% przy zamkniętych drzwiach wewnętrznych. W wariantach W1b i W2b różnica wyniosła tylko 1%. Wynik wskazuje na to, że przy ocieplonym klimacie wpływ otwarcia drzwi na zużycie ciepła będzie nieistotny.



Rys. 8.9. Roczne zużycie ciepła i chłodu (energia końcowa)

Rozpatrując tylko warianty W4–W6 z pasywnym chłodzeniem, można dostrzec, że najmniejsze wartości zużycia ciepła wystąpiły dla wariantu W6. Zgodnie z oczekiwaniami niższe wartości zużycia ciepła otrzymano dla klimatu prognozowanego przyszłego niż obecnego. W wariantcie W4 wystąpił większy spadek zużycia ciepła o 2% do 7% niż w wariantcie W6. Uwzględnienie prawdopodobieństwa w wariantach W5a–W5c przyczyniło się do znacznego wzrostu zużycia ciepła w porównaniu z wariantem W6 o 34% do 57% w klimacie TLM2000 i o 17% do 34% w klimacie przyszłym. Nawet w wariantcie W5c z 75% prawdopodobieństwem różnice były znaczne: od 17% do nawet 45%.

Dla zobrazowania wpływu chłodzenia pasywnego na wzrost zużycia ciepła na Rys. 8.10 przedstawiono dobowy przebieg temperatury operatywnej, wymiany powietrza oraz zużycia ciepła dla przykładowego dnia okresu przejściowego. Przebieg temperatury operatywnej w ciągu całej doby mieścił się w granicach II kategorii środowiska, nawet w godzinach nocnych pomimo dużego przepływu powietrza przez otwarte okno. Następnie w ciągu dnia okno było jeszcze 3 razy otwierane, za drugim i trzecim razem zaobserwowano znaczący wzrost zużycia ciepła z poziomu bliskiego zeru do maksymalnie 1,75 kW (o godz. 20:30). Pozostałe dwa znaczące wzrosty wartości zużycia ciepła odnotowano w godz. 3:00 ze względu na niską temperaturę zewnętrzną i napływ chłodnego powietrza do pomieszczenia przez otwarte okno oraz po godz. 6:00, kiedy system ogrzewania zgodnie z przyjętymi założeniami zmieniał temperaturę nastawy z 18°C na 21°C. Co istotne, gdyby okna w ciągu omawianej doby były przez cały czas zamknięte, zużycie ciepła byłoby na zerowym poziomie. W godzinach z otwartym oknem liczba wymian powietrza wynosiła od 2,5 h⁻¹ do 5 h⁻¹.



Rys. 8.10. Przebieg zmienności temperatury operatywnej oraz zużycia ciepła i liczby wymian powietrza w pokoju nr 2 w dniu 17 maja wraz z zaznaczoną pozycją otwarcia okna: zamkniętą „z” (kolor czerwony), mikrouchyłu „m” (kolor zielony), otwartą „o” (kolor niebieski)

W Tab. 8.8 przedstawiono porównanie energii końcowej w budynku na potrzeby ogrzewania i chłodzenia w zależności od źródła ciepła dla wariantów z otwartymi drzwiami wewnętrznymi. Wielkość zużycia energii była odwrotnie proporcjonalna do sprawności danego źródła. Najwyższe wartości zużycia ciepła wystąpiły przy kotle na biomasę, a najniższe przy pompie ciepła – ich różnica wyniosła prawie 75% (wynikała ona z założonych sprawności źródeł ciepła). Odchyłki w wynikach między kotłem elektrycznym a gazowym były znikome (około 4%) w porównaniu do kotła węglowego o zdecydowanie niższej sprawności systemu, gdzie zużycie ciepła było wyższe o 22% niż w kotle elektrycznym. W przypadku klimatu prognozowanego na 2050 rok wartości zużycia ciepła zmalały w porównaniu z klimatem TLM2000 w zależności od wariantu o 7% do 21%, a chłodu wzrosły o 55%.

Tab. 8.8. Zestawienie zużycia ciepła i chłodu dla wariantów studium przypadku

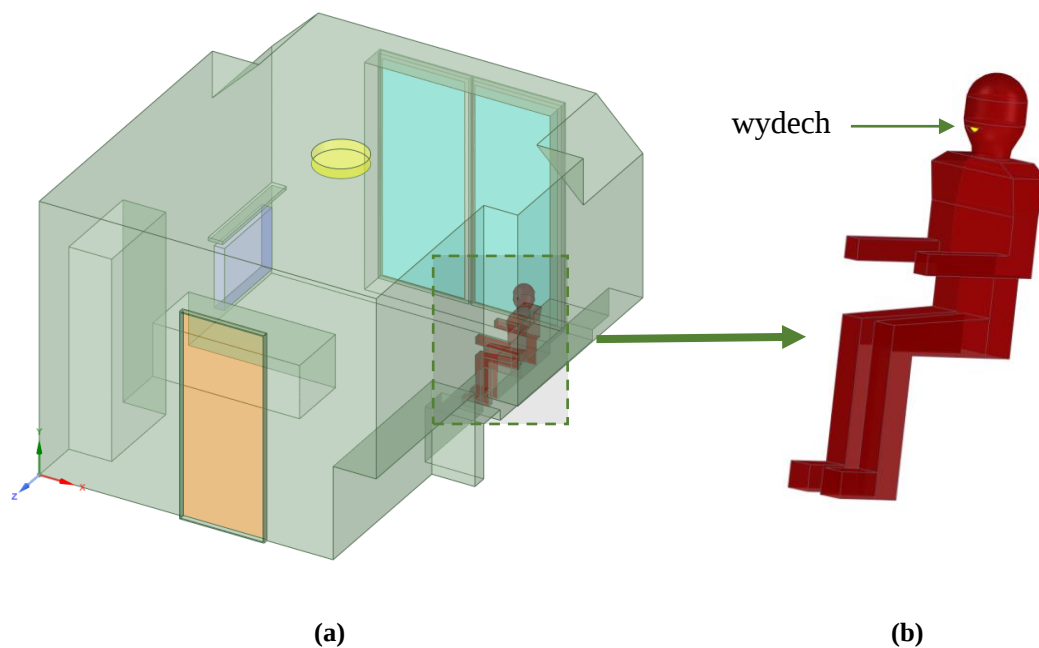
Klimat	Paliwo	1b	2b		4	5a	5b	5c	6
		$Q_{k,H}$	$Q_{k,H}$	$Q_{k,C}$	$Q_{k,H}$	$Q_{k,H}$	$Q_{k,H}$	$Q_{k,H}$	$Q_{k,H}$
		kWh							
TLM2000	Gaz ziemny	5975	6075	509	6767	10014	10263	9462	6531
	Węgiel kamienny	6980	7097		7904	11698	11989	11053	7629
	Biomasa	8176	8313		9260	13703	14044	12948	8937
	Energia elektryczna (kocioł)	5723	5819		6482	9592	9831	9064	6256
	Energia elektryczna (pompa ciepła)	2091	2126		2368	3505	3592	3312	2286
2050	Gaz ziemny	5356	5384	792	6238	7856	8140	7710	6062
	Węgiel kamienny	6256	6290		7287	9177	9509	9006	7081
	Biomasa	7329	7368		8537	10750	11140	10550	8295
	Energia elektryczna	5130	5158		5976	7525	7798	7385	5807
	Energia elektryczna (pompa ciepła)	1874	1885		2183	2750	2849	2698	2122

8.2 Prognozowanie numeryczne CFD rozkładu parametrów powietrza w pomieszczeniu

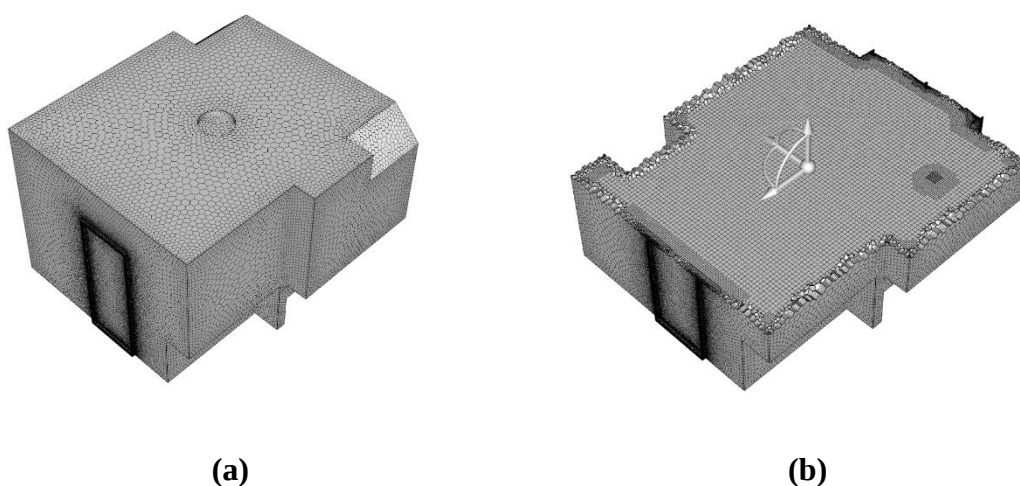
Na podstawie przeprowadzonej walidacji eksperymentalnej modelu CFD (rozdz. 7.7) do obliczeń numerycznych w ramach studium przypadku przyjęto następujące założenia:

- wprowadzono model człowieka z zyskami ciepła opisanymi warunkiem brzegowym *Wall* zadaną temperaturą powierzchni skóry równą 36°C oraz o emisyjności $\varepsilon=0,98$, zyskami wilgoci o strumieniu masy $3,6 \cdot 10^{-6}$ kg/s *inlet* i z zamodelowanym wydechem o temperaturze równej 34°C opisanymi warunkiem brzegowym *mass-flow* [225];
- w celu uwzględniania zysków od nasłonecznienia istotnych w okresie letnim przyjęto model promieniowania słonecznego *Solar Ray Tracing (STR)* oraz model promieniowania cieplnego *Surface to Surface (S2S)* stosowany w tego typu obliczeniach;
- zyski od promieniowania słonecznego oraz stopień zachmurzenia określono na podstawie danych klimatycznych EPW (patrz rozdz. 6.4.6);
- dla wariantów z otwartymi drzwiami powierzchnię drzwi opisaną warunkiem brzegowym *pressure outlet*;
- ze względu na ograniczoną moc obliczeniową komputera i potrzebę wprowadzenia modelu człowieka uproszczono geometrię pomieszczenia, np. geometrię poduszek na sofie, czy wyrównano wysokości szafki (Rys. 8.11) w sposób, który istotnie nie wpływał na wyniki symulacji, a poprawiał ich zbieżność;

- po modyfikacjach siatka obliczeniowa (Rys. 8.12) składała się z 2 100 939 komórek (*cells*), 8 831 028 powierzchni (*faces*) i 4 880 302 węzłów (*nodes*). Wartości maksymalnej względnej odległości przysiennej Y^+ przedstawiono w Tab. 8.11.



Rys. 8.11. a) Model numeryczny badanego pomieszczenia z wprowadzonymi zmianami, b) model człowieka



Rys. 8.12. Widok izometryczny pomieszczenia z siatką powierzchniową oraz przekrój przez siatkę objętościową w płaszczyźnie ZX, (b) modelu numerycznego badanego pomieszczenia z człowiekiem

8.2.1 Warianty

W ramach studium przypadku przygotowano 8 scenariuszy obliczeń numerycznych (Tab. 8.9 i Tab. 8.10). Do analizy wybrano przypadki w taki sposób, aby pokazać oddziaływanie pasywnego chłodzenia na warunki środowiska wewnętrznego w jak najszerszym zakresie. Oceniono wybrane czynniki wpływające na efektywność omawianego systemu, tj. otwarcie drzwi wewnętrznych i klimat.

Tab. 8.9. Zestawienie wariantów symulacyjnych CFD w ramach studium przypadku

Nr wariantu	Klimat	Kryterium wyboru	Drzwi otwarte	Pozycja okna
C1	TLM2000	Maksymalna prędkość wiatru	Nie	Uchylone
C2	TLM2000	Maksymalna prędkość wiatru	Tak	Uchylone
C3	TLM2000	Minimalna prędkość wiatru	Nie	Uchylone
C4	TLM2000	Minimalna prędkość wiatru	Tak	Uchylone
C5	TLM2000	Maksymalna temperatura powietrza wewnętrznego	Nie	Zamknięte
C6	TLM2000	*Maksymalna temperatura powietrza wewnętrznego	Tak	Zamknięte
C7	2050	Maksymalna temperatura powietrza wewnętrznego	Nie	Uchylone
C8	TLM2000	Minimalna temperatura w pomieszczeniu	Tak	Uchylone

* Symulacje dla wariantów C1-C2, C3-C4 i C5-C6 zostały przeprowadzone dla takiego samego kroku czasowego, tak aby umożliwić ich porównanie. Krok czasowy dla przypadków C5 i C6 wyznaczono w oparciu o maksymalną wartość temperatury powietrza wewnętrznego przy zamkniętych drzwiach występującą w wariancie C5. W związku z tym nie jest to wartość maksymalna dla wariantu C6 z otwartymi drzwiami

Tab. 8.10. Zestawienie wariantów symulacyjnych CFD w ramach studium przypadku (ciąg dalszy)

Nr wariantu	Data	Godzina	Prędkość wiatru	Kierunek wiatru	Temperatura operatywna	
					Dolna granica	Górna granica
C1	7.06	16:00	7 m/s	220° (SW)	19,8°C	25,8°C
C2	7.06	16:00	7 m/s	220° (SW)	19,8°C	25,8°C
C3	3.07	18:00	0 m/s	-	22,5°C	28,5°C
C4	3.07	18:00	0 m/s	-	22,5°C	28,5°C
C5	30.06	18:00	2 m/s	293° (WNW)	22,4°C	28,4°C
C6	30.06	18:00	2 m/s	293° (WNW)	22,4°C	28,4°C
C7	8.08	18:00	2 m/s	230° (SW)	25,2°C	31,2°C
C8	8.06	3:00	1 m/s	200° (SSW)	27,0°C	21,0°C

Tab. 8.11. Zestawienie maksymalnej względnej odległości przyściennej Y^+ dla wariantów C1–C8

Wariant	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Y^+	13,1	76,1	12,5	20,0	10,5	19,5	11,1	39,1

8.2.2 Warunki brzegowe

Warunki brzegowe dla poszczególnych wariantów zostały przygotowane w oparciu o wyniki symulacji energetycznej budynku. Wartości współczynników przenikania ciepła przegród przezroczystych i nieprzezroczystych przyjęto takie same jak w trakcie walidacji modelu numerycznego (Tab. 5.1). W Tab. 8.12 i Tab. 8.13 przedstawiono zestawienie warunków brzegowych.

Tab. 8.12. Zestawienie warunków brzegowych przegród przylegających do domeny obliczeniowej wraz z zadaną temperaturą powietrza po zewnętrznej stronie

Wariant/ Przegroda	Ściana zewnętrzna, Okno	Ściana wewnętrzna	Sufit	Podłoga	Drzwi wewnętrzne
C1	21,1°C	23,4°C	18,3°C	24,1°C	23,1°C
C2	21,1°C	23,3°C	18,3°C	23,4°C	23,3°C
C3	26,5°C	26,8°C	36,3°C	28,6°C	25,5°C
C4	26,5°C	28,8°C	36,3°C	27,8°C	28,1°C
C5	24,2°C	27,2°C	22,3°C	27,9°C	26,2°C
C6	24,2°C	27,0°C	22,3°C	27,0°C	27,0°C
C7	35,0°C	33,5°C	46,8°C	32,7°C	32,9°C
C8	11,2°C	18,8°C	13,4°C	21,7°C	17,5°C

Tab. 8.13. Zestawienie warunków brzegowych: strumienia powietrza infiltrującego, natężenia promieniowania słonecznego bezpośredniego i rozproszonego oraz wskaźnika zachmurzenia

Wariant	Strumień powietrza wypływający ze szczeliny okiennej	Natężenie promieniowania słonecznego bezpośredniego	Natężenie promieniowania słonecznego rozproszonego	Zachmurzenie
C1	0,051 kg/s	317 W/m ²	188 W/m ²	90%
C2	0,631 kg/s	317 W/m ²	180 W/m ²	90%
C3	0,044 kg/s	288 W/m ²	72 W/m ²	20%
C4	0,042 kg/s	288 W/m ²	72 W/m ²	20%
C5	0,001 kg/s	303 W/m ²	105 W/m ²	90%
C6	0,001 kg/s	303 W/m ²	105 W/m ²	90%
C7	0,051 kg/s	378 W/m ²	24 W/m ²	30%
C8	0,306 kg/s	0 W/m ²	0 W/m ²	10%

8.2.3 Kryteria oceny warunków środowiska wewnętrznego w ujęciu lokalnym

Ocenę warunków środowiska wewnętrznego przeprowadzono na podstawie parametrów powietrza wewnętrznego: prędkości i temperatury. Wykonano analizę ilościową i jakościową.

Analizę ilościową przeprowadzono w oparciu o wyniki symulacji uzyskane dla strefy przebywania ludzi oraz punktów monitorowania znajdujących się w pobliżu modelu człowieka na wysokości kostek 0,1 m, brzucha 0,6 m, ramion 1,0 m i głowy 1,1 m [226]. Strefę przebywania określono na podstawie wytycznych podanych w normie ASHRAE [193]. Jest to obszar ograniczony płaszczyznami: górną, poziomą płaszczyzną na wysokości 1,8 m oraz płaszczyznami pionowymi oddalonymi o 0,6 m od ścian. Ze względu na to, że model człowieka był zlokalizowany na granicy strefy przebywania ludzi, to płaszczyznę graniczną pionową umiejscowiono w odległości 0,45 m od ściany przy sofie, a nie 0,6 m. Tak aby cały model znajdował się w jej granicach. Strefę przebywania ludzi oraz punkty monitorowania przedstawiono na Rys. 8.13. Wyniki analizy jakościowej przedstawiono za pomocą rozkładów parametrów powietrza na płaszczyznach pionowych YZ, X=3 m i XY, Z=-2,9 m przechodzących przez model człowieka, XY, Z=-2,06 m przechodzącej przez środek pomieszczenia oraz poziomych na wysokości kostek XZ, Y=0,1 m, brzucha (śpiącego człowieka) XZ, Y = 0,6 m i głowy (w pozycji stojącej) XZ, Y=1,7 m. Czarną przerywaną linią na rozkładach zaznaczono obszar strefy przebywania ludzi.

Do oceny warunków środowiska wewnętrznego przyjęto następujące założenia:

- minimalna wartość prędkości powietrza powinna wynosić 0,05 m/s [226] , zatem zakres (0;0,05 m/s) dalej będzie określany „martwą strefą powietrza”;
- ocenę maksymalnych wartości prędkości powietrza wykonano na podstawie wskaźnika ryzyka przeciągu obliczonego wg wzoru (11);
- średnie wartości parametrów powietrza (prędkości i temperatury) w strefie przebywania ludzi obliczono jako średnie wagowe zgodnie ze wzorem (12) podanym w dokumentacji programu ANSYS Fluent [217];
- udział procentowy objętości strefy przebywania ludzi, w której występuje „martwa strefa powietrza”, obliczono zgodnie ze wzorem (13);
- udział procentowy objętości strefy przebywania ludzi, w której temperatura powietrza jest w zakresie II kategorii środowiska wewnętrznego, obliczono zgodnie ze wzorem (14);
- podobnie jak w przypadku analizy wyników pomiarów (rozdz. 5.3.2) założono, że temperatura powietrza jest zbliżona do temperatury operatywnej. Zakres wartości temperatury operatywnej dla poszczególnego wariantu symulacyjnego wyznaczono na podstawie wykresu przedstawionego na Rys. 6.5.

$$DR = (34 - t_a) \cdot (v_a - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v_a \cdot Tu + 3,14) \quad (11)$$

gdzie:

t_a – lokalna temperatura powietrza, °C; v_a – lokalna prędkość powietrza, m/s; Tu – lokalna intensywność turbulencji, %

Wartości: t_a , v_a , Tu potrzebne do obliczeń wskaźnika DR odczytano bezpośrednio z wyników obliczeń w punktach monitorowania. Zgodnie z normą [166] do oceny ryzyka przeciągu wybrano maksymalną wartość DR z rozpatrywanych wysokości, która dla najwyższej kategorii A nie powinna przekraczać 10%, a dla kategorii B 20% (odpowiedniej dla badanego budynku).

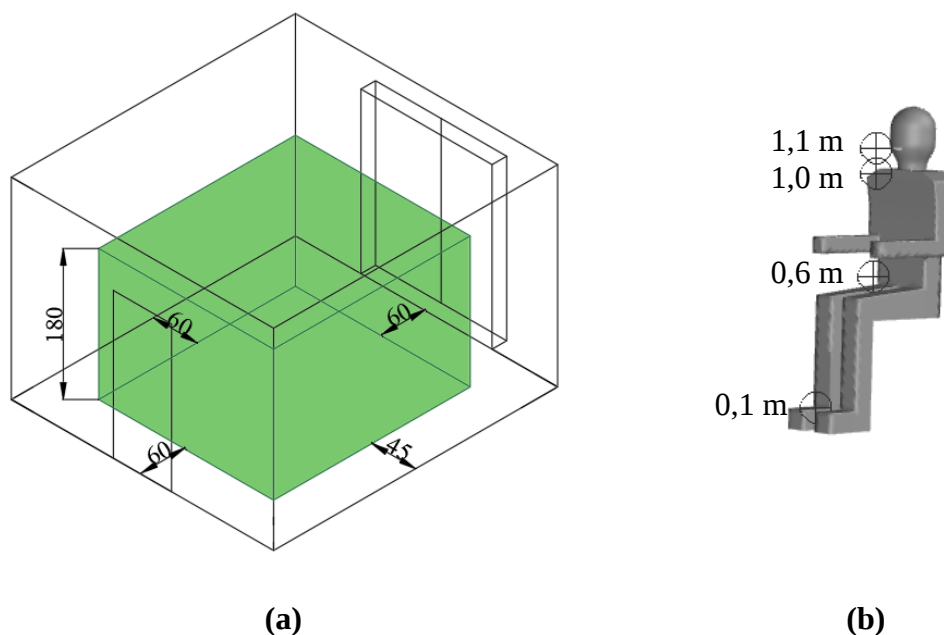
$$\phi_{sr} = \frac{1}{V_{komf}} \int \phi dV_{komf} = \frac{1}{V_{komf}} \sum_{i=1}^n \phi_i \cdot |V_i| \quad (12)$$

$$v_0 = \frac{\sum_{j=1}^n |V_j|}{V_{komf}} \quad (13)$$

$$p_{Kat.II} = \frac{\sum_{k=1}^n |V_k|}{V_{komf}} \quad (14)$$

gdzie:

ϕ_{sr} – średnia ważona wielkości; V_{komf} – całkowita objętość komórek w strefie przebywania ludzi, m³; $|V_i|$ – objętość i-tej komórki w strefie przebywania ludzi, m³; v_0 – udział procentowy martwej strefy powietrza; $|V_j|$ – objętość j-tej komórki w strefie przebywania ludzi, w której wartość prędkości powietrza jest mniejsza niż 0,05 m/s, m³; $p_{Kat.II}$ – udział procentowy strefy z temperaturą powietrza w II kategorii środowiska $|V_k|$ – objętość j-tej komórki w strefie przebywania ludzi, w której wartość temperatury powietrza jest w zakresie temperatury komfortu, m³.



Rys. 8.13. a) Model pomieszczenia z zaznaczoną strefą przebywania ludzi; b) Model człowieka wraz z zaznaczonymi punktami monitorowania

8.2.4 Wyniki

W celu kontrolnej weryfikacji otrzymanych wyników prognozowania numerycznego CFD porównano ze sobą wartości średniej temperatury powietrza wewnętrznego w całym pomieszczeniu uzyskane w ramach symulacji energetycznych i CFD. W Tab. 8.14 zestawiono wartości względnej różnicy. Dla wszystkich wariantów mieściła się ona w granicy do maksymalnie 7%, co wskazuje na dobre odwzorowanie modelu w ramach obliczeń CFD. W Tab. 8.15 przedstawiono zestawienie wyników symulacji CFD dla omawianych wariantów. Wartości parametrów powietrza obliczono dla strefy przebywania ludzi.

Tab. 8.14. Zestawienie różnicy wartości średniej temperatury powietrza wewnętrznego w pomieszczeniu uzyskanej w ramach symulacji CFD względem wartości otrzymanej w symulacji energetycznej dla wariantów C1–C8

Wariant	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
δ	2,3%	6,8%	3,4%	1,4%	4,8%	0,8%	5,0%	3,0%

Tab. 8.15. Zestawienie wyników symulacji CDF w strefie przebywania ludzi

Nr wariantu	Wartość	v_i	t_i	DR	v_o	$p_{Kat.II}$	N
C1	minimalna	0,00 m/s	24,5°C	5,8%	69,3%	6,0%	3,02 h ⁻¹
	maksymalna	0,38 m/s	36,7°C				
	średnia	0,06 m/s	26,6°C				
C2	minimalna	0,00 m/s	22,0°C	13,6%	13,2%	85,8%	37,73 h ⁻¹
	maksymalna	2,89 m/s	36,7°C				
	średnia	0,38 m/s	23,1°C				
C3	minimalna	0,00 m/s	24,5°C	2,1%	69,5%	15,5%	2,62 h ⁻¹
	maksymalna	0,31 m/s	38,8°C				
	średnia	0,05 m/s	30,4°C				
C4	minimalna	0,00 m/s	24,5°C	7,8%	26,4%	33,7%	2,48 h ⁻¹
	maksymalna	0,57 m/s	39,4°C				
	średnia	0,12 m/s	28,4°C				
C5	minimalna	0,00 m/s	24,5°C	0,2%	81,7%	15,5%	0,05 h ⁻¹
	maksymalna	0,31 m/s	42,2°C				
	średnia	0,03 m/s	31,9°C				
C6	minimalna	0,00 m/s	24,5°C	9,2%	25,9%	96,1%	0,05 h ⁻¹
	maksymalna	0,55 m/s	38,4°C				
	średnia	0,11 m/s	27,7°C				
C7	minimalna	0,00 m/s	24,5°C	0,0%	64,9%	14,9%	3,07 h ⁻¹
	maksymalna	0,31 m/s	48,9°C				
	średnia	0,05 m/s	36,3°C				
C8	minimalna	0,00 m/s	12,7°C	0,0%	15%	15,0%	18,31 h ⁻¹
	maksymalna	1,32 m/s	36,7°C				
	średnia	0,20 m/s	16,5°C				

8.2.5 Ocena wpływu otwarcia drzwi wewnętrznych na warunki środowiska wewnętrznego w ujęciu lokalnym

Podrozdział stanowi uzupełnienie analizy wyników przeprowadzonej w rozdz. 8.1.4. Skupiono się na porównaniu warunków środowiska wewnętrznego przy zamkniętych i otwartych drzwiach w warunkach dużej prędkości wiatru (C1 vs. C2), przy bezwietrznej pogodzie (C3 vs. C4) oraz przy wysokiej temperaturze powietrza wewnętrznego (C5 vs. C6).

Na podstawie przeprowadzonych symulacji (Tab. 8.15) można stwierdzić, że otwarcie drzwi wpłynęło korzystnie na parametry powietrza (prędkość i temperaturę) pod kątem zapewniania komfortu cieplnego mieszkańcom. Zauważono, że w strefie przebywania

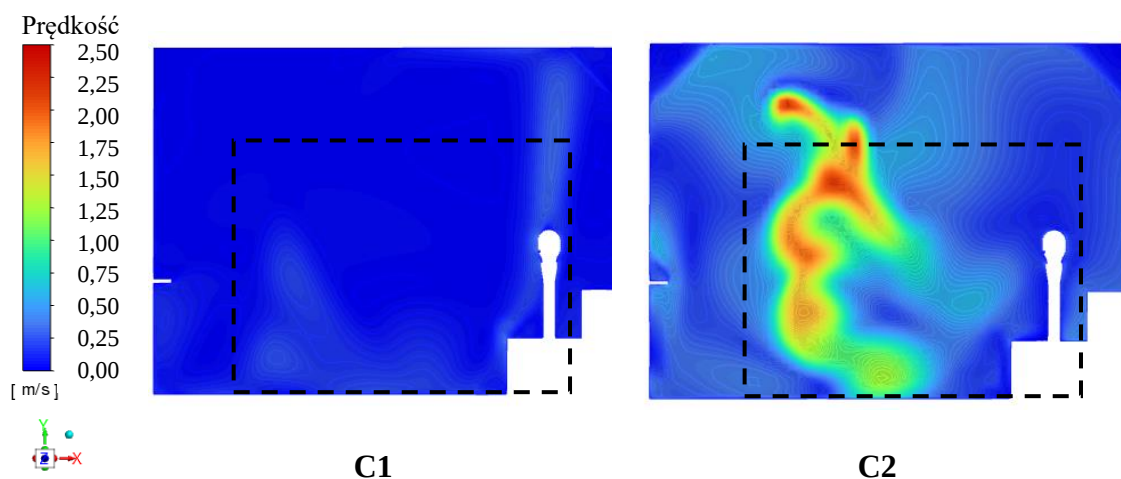
ludzi w wariantach z otwartymi drzwiami (C2, C4, C6) objętość „martwej strefy powietrza” nie stanowiła więcej niż 26% całej przestrzeni, a przy wysokiej prędkości wiatru (C2) występowały miejsca bez przepływu powietrza w granicy 13%. W porównaniu z wariantami (C1, C3, C5), gdzie udział „martwej strefy powietrza” stanowił od 69% do 82%, warianty z otwartymi drzwiami wypadają korzystniej, równocześnie wskaźnik DR mieścił się dla wszystkich przypadków w dopuszczalnych granicach II kategorii środowiska, a w przypadku C4 i C6 nawet pierwszej. Wskaźnik DR był zdecydowanie niższy w wariantach z zamkniętymi drzwiami. Największą różnicę zaobserwowano w porównaniu wariantów C5 i C6, gdzie DR różnił się o 9 punktów procentowych. Wielkość „martwej strefy powietrza” potwierdzają również wartości średniej prędkości powietrza dla wariantów C1, C3, C5, która była skrajnie niska: od 0,03 m/s do 0,06 m/s, a w wariantach C2, C4 i C6 wynosiła od 0,11 m/s do 0,38 m/s. Zaobserwowano również, że w wariantach C2 wartość maksymalnej prędkości powietrza była wysoka, wynosząca aż 2,89 m/s, co świadczy o występowaniu obszarów mocno narażonych na przeciąg w strefie przebywania ludzi.

Średnia wartość temperatury powietrza w większości przypadków była wyższa niż górna dopuszczalna wartość temperatury zapewniającej komfort mieszkańcom zgodnie z kryteriami dla II kategorii środowiska. Jedynie dla przypadków z otwartymi drzwiami C2 i C6, gdzie prędkość wiatru wynosiła co najmniej 2 m/s, uzyskano warunki komfortu w większości strefy przebywania ludzi (od 86% do 96%). We wszystkich wariantach otwarcie drzwi spowodowało spadek temperatury o 2,0°C do 4,2°C. Najgorsze warunki środowiska wewnętrznego pod kątem temperatury powietrza wystąpiły dla wariantów C3, C5 i C7.

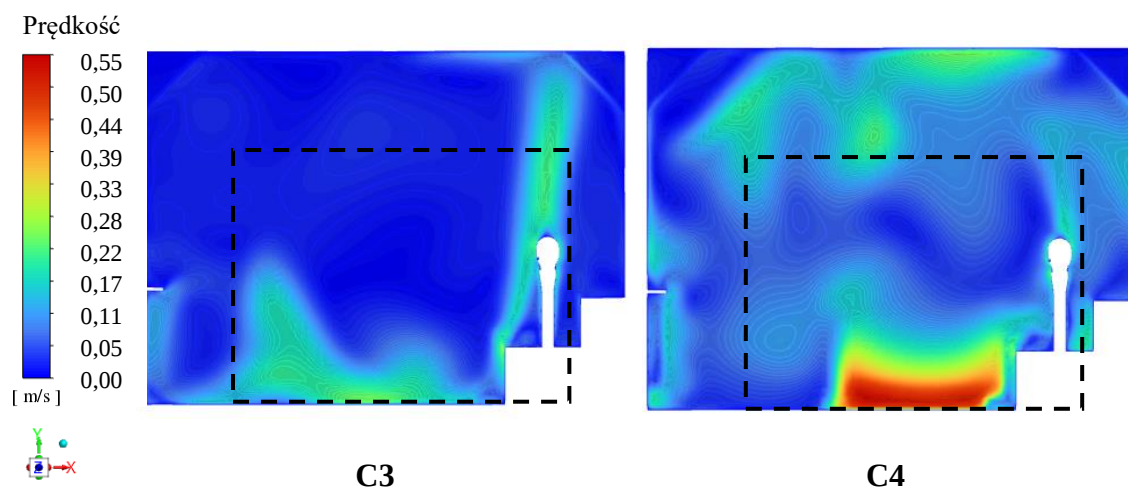
Na rysunkach Rys. 8.14, Rys. 8.15 i Rys. 8.16 przedstawiono porównanie rozkładów prędkości powietrza przy zamkniętych i otwartych drzwiach dla przypadków C1–C6. Przy zamkniętych drzwiach we wszystkich przypadkach C1, C3, C5 wartości prędkości powietrza były niskie i maksymalnie wynosiły od 0,22 m/s do 0,37 m/s. Wartości wskaźnika DR również potwierdziły niewielkie ryzyko powstania przeciągu – poniżej 10% (Tab. 8.15). Natomiast przy otwartych drzwiach otrzymano zdecydowanie wyższe wartości prędkości powietrza dla przypadku C2, wynoszące powyżej 2 m/s w środkowej części płaszczyzny. Dla przypadków C4 i C6 największe wartości w rozkładzie prędkości w okolicach 0,5 m/s zaobserwowano przy kostkach, gdzie wskaźnik DR wyniósł 7,8% i 9,2%. W porównaniu z przypadkami z zamkniętymi drzwiami przy otwartych drzwiach na rozkładach prędkości i temperatury zaobserwowano lepsze mieszanie powietrza powodujące uzyskanie jednolitej temperatury w pomieszczeniu. Jednak pomimo tego na części rozkładów w wariantach C4 i C6 uzyskano martwe strefy powietrza mogące powodować dyskomfort u osób przebywających w pomieszczeniu. Natomiast w wariantach C1, C3, C5 martwe strefy powietrza występowały na znacznej części przekroju. Jedynie w sytuacji wysokiej wartości prędkości wiatru (C2) nie wystąpiły martwe strefy powietrza na omawianych rozkładach parametrów powietrza. Dla tego wariantu zaobserwowano również duże zaburzenia strumienia konwekcyjnego powstającego nad człowiekiem, szczególnie w strefie znacznego przyrostu prędkości unoszącego się powietrza. Przyczyną tego zjawiska było otwarcie drzwi. Mniejsze, ale

również widoczne zaburzenia wystąpiły w pozostałych przypadkach z otwartymi drzwiami (C4, C6). Najbardziej jednolity rozkład temperatury powietrza uzyskano w wariancie C2. Średnia wartość temperatury powietrza była wyższa dla przypadków z zamkniętymi drzwiami i wynosiła 26,6°C (C1), 30,4°C (C3), 31,9°C (C5) oraz 23,1°C (C2), 28,4 (C4) i 27,7°C (C6).

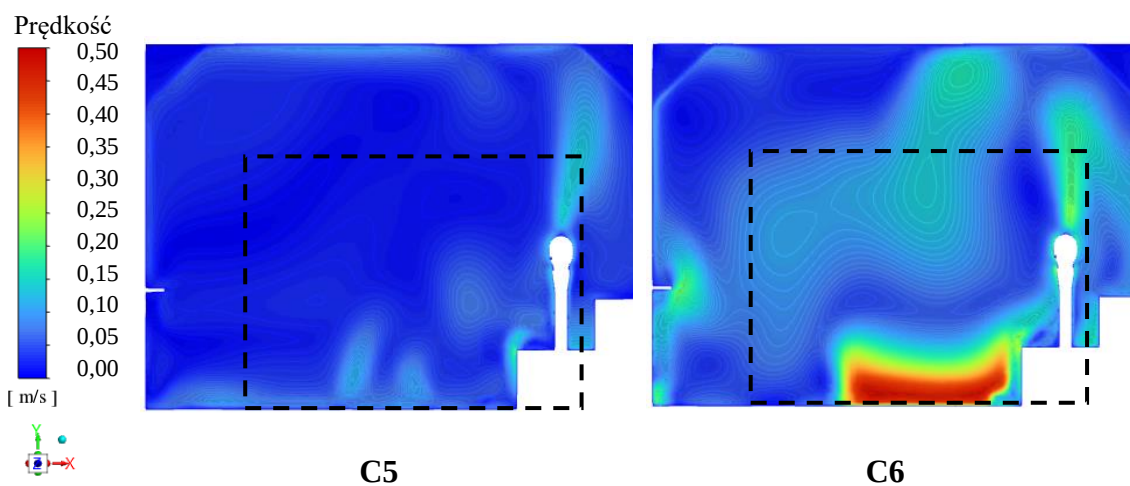
W wariantach porównywanych C3 i C4 oraz C5 i C6 liczba wymian powietrza była na podobnym poziomie niezależnie od konfiguracji otwarcia drzwi (Tab. 8.15). W przypadkach C3 i C4 spełniała wymagania II kategorii środowiska wewnętrznego, a w wariantach C5 i C6 z zamkniętym oknem już nie. Pomimo uzyskania wymaganej wymiany powietrza, w obu wariantach (C3 i C4) wystąpiły przestrzenie z „martwą strefą powietrza”, ale w mniejszym obszarze w wariancie C4 z otwartymi drzwiami. Zaobserwowano również, że niezależnie od wielkości wymiany powietrza (nawet niespełniającej wymagań II kategorii środowiska) otwarcie drzwi zmniejszyło obszar „martwej strefy powietrza” do zbliżonej wartości 25–27%. Drugim korzystnym efektem był spadek średniej temperatury powietrza o 2,0°C (C4) i 3,5°C (C2).



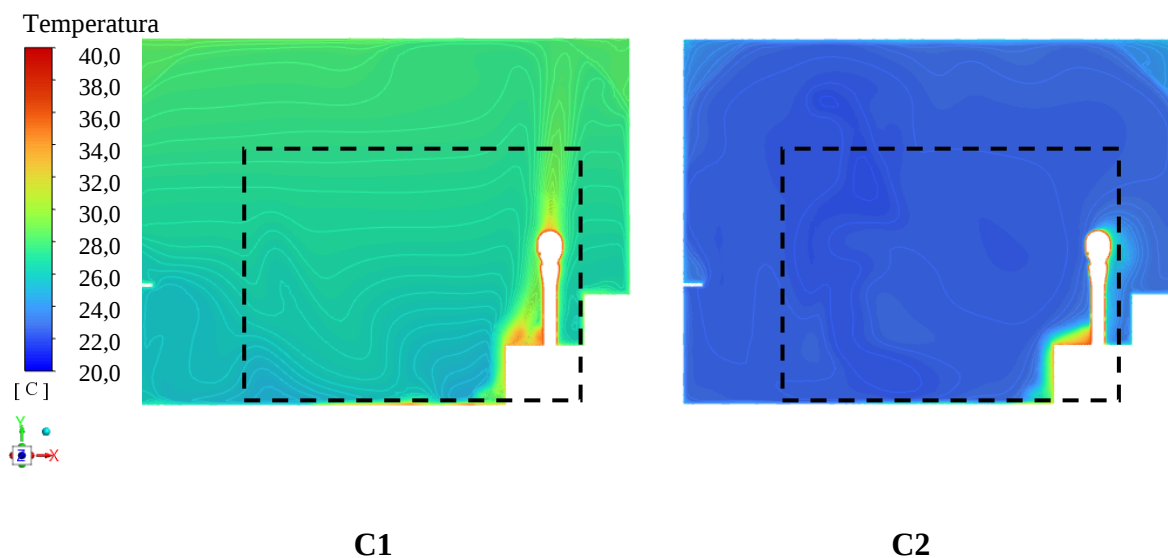
Rys. 8.14. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, Z = -2,9 m dla wariantu C1 i C2



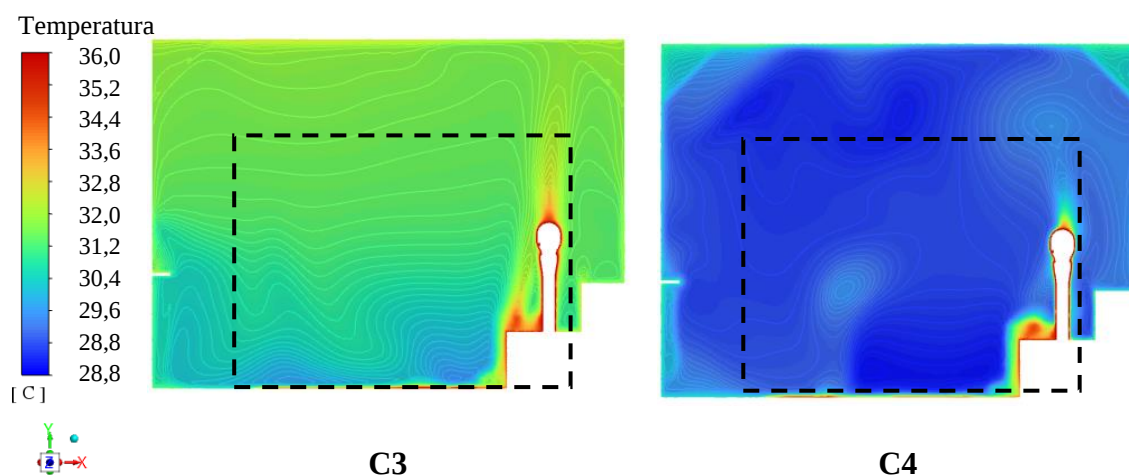
Rys. 8.15. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, Z = -2,9 m dla wariantu C3 i C4



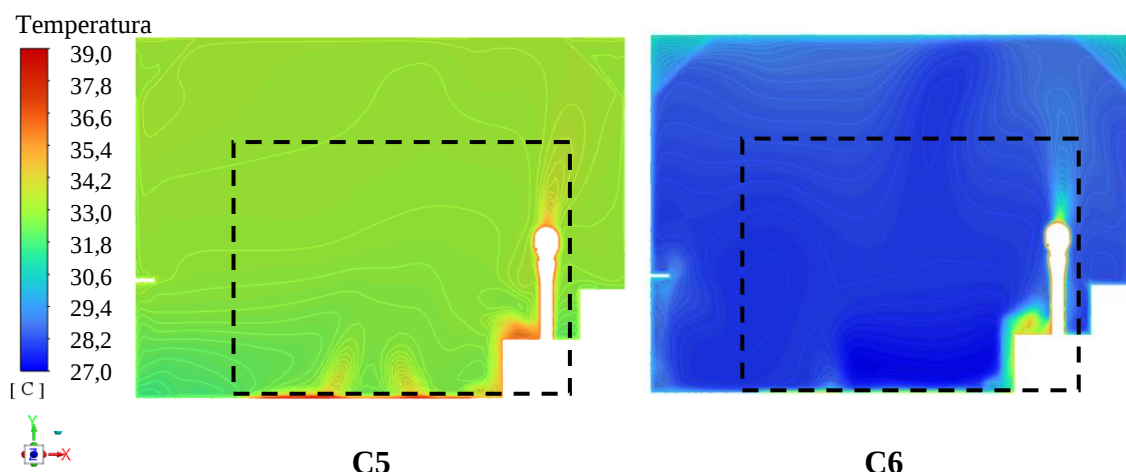
Rys. 8.16. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, $Z = -2,9$ m dla wariantu W5 i W6



Rys. 8.17. Rozkład temperatury powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, $Z = -2,9$ m dla wariantu C1 i C2



Rys. 8.18. Rozkład temperatury powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, $Z = -2,9$ m dla wariantu C3 i C4



Rys. 8.19. Rozkład temperatury powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, Z = -2,9 m dla wariantu C5 i C6

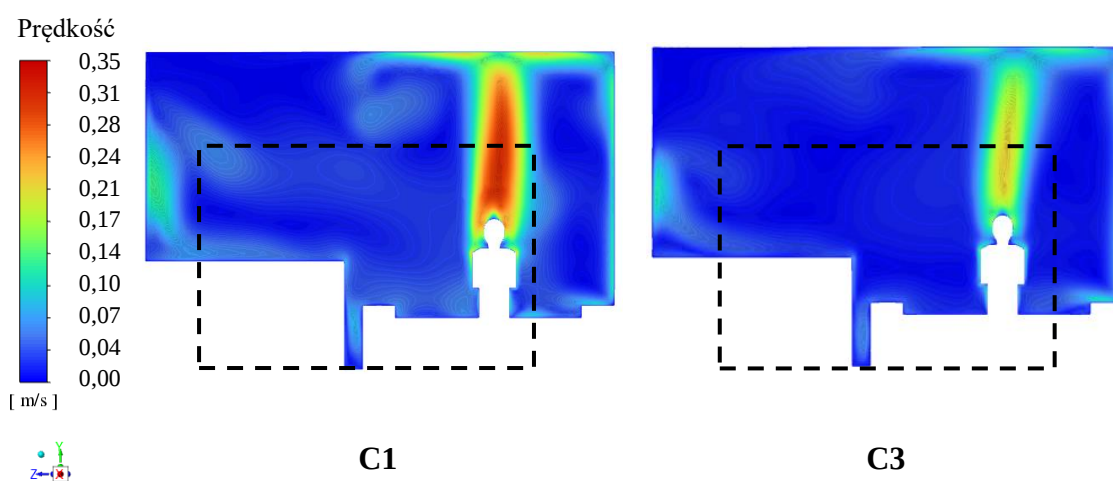
8.2.6 Ocena wpływu prędkości wiatru na rozkład prędkości powietrza w pomieszczeniu

W drugim kroku dokonano analizy dla przypadków z maksymalną prędkością wiatru w czasie przebywania ludzi w pomieszczeniu wynoszącą $w=7$ m/s oraz przy bezwietrznej pogodzie $w=0$ m/s. Porównano ze sobą przypadki z tym samym ustawieniem drzwi, a skrajnie różną prędkością wiatru: C1 vs. C3 (drzwi zamknięte) oraz C2 vs. C4 (drzwi otwarte).

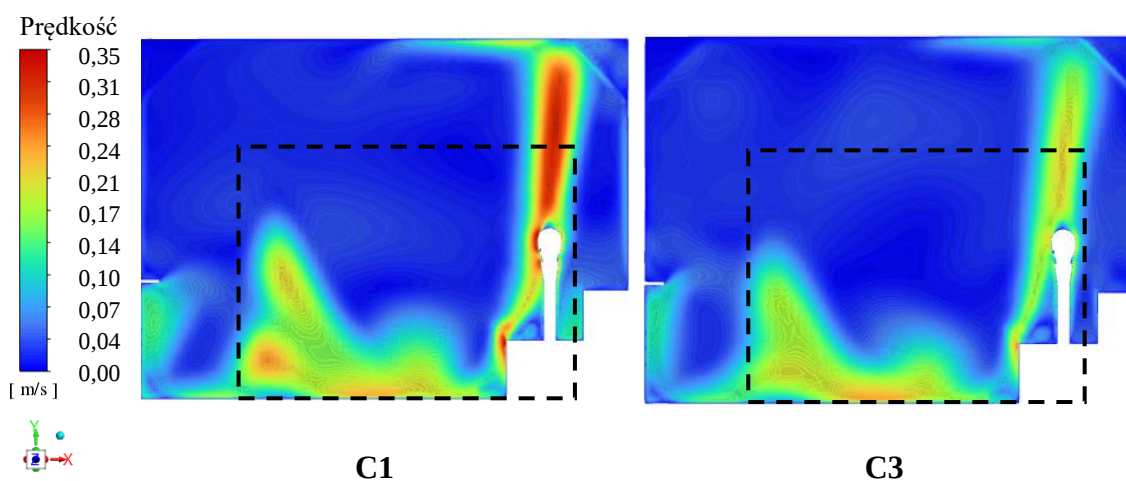
W sytuacji, gdy w pomieszczeniu drzwi były zamknięte, różnice w rozkładach prędkości (Rys. 8.20 i Rys. 8.21) były nieznaczne, średnie wartości prędkości wyniosły 0,06 m/s (C1) i 0,05 m/s (C3) (Rys. 8.20) oraz 0,05 m/s (C1) i 0,03 m/s (C3) (Rys. 8.21). Na większości powierzchni, na których oceniano rozkład prędkości powietrza, wartość ta była bardzo niska. Jedynie w dolnej części pomieszczenia zaobserwowano większy przepływ powietrza – w granicy 0,1–0,3 m/s – oraz nad modelem człowieka pochodzący ze strumienia konwekcyjnego. Wyniki te potwierdza analiza przeprowadzona w rozdz. 8.2.5.

Natomiast w przypadku otwartych drzwi wystąpiły widoczne i znaczące różnice w przepływie powietrza w zależności od wartości prędkości wiatru. Średnia prędkość powietrza wyniosła $v_{sr}=0,38$ m/s przy $w=7$ m/s i $v_{sr}=0,12$ m/s przy $w=0$ m/s. W sytuacji bezwietrznej pogody (wariant C4) występowały większe obszary z „martwą strefą powietrza” w 26% strefy przebywania ludzi. Natomiast przy wysokiej prędkości wiatru w pomieszczeniu 13% strefy ruchu powietrza było na poziomie minimum $v_i=0,05$ m/s, ale za to wystąpiły obszary z wysokim ryzykiem przeciągu, co zostało omówione w rozdz. 8.2.5. W celu pokazania zasięgu strugi powietrza infiltrującego do pomieszczenia przedstawiono rozkłady prędkości powietrza na wysokości kostek (Rys. 8.24) i głowy (Rys. 8.25) zlokalizowanej na wysokości 1,7 m, czyli osób stojących. W wariantcie C4 nie odnotowano obszarów ze zbyt wysoką prędkością powietrza, a w przypadku C2 już tak. Obszary wystąpiły na wysokości kostek w zasięgu strugi obejmującej część pomieszczenia w pobliżu okna i nie dochodzącej dalej niż 1,8 m. W tych obszarach prędkość powietrza wynosiła maksymalnie około 2 m/s. Natomiast na rozkładzie przedstawionym na Rys. 8.25

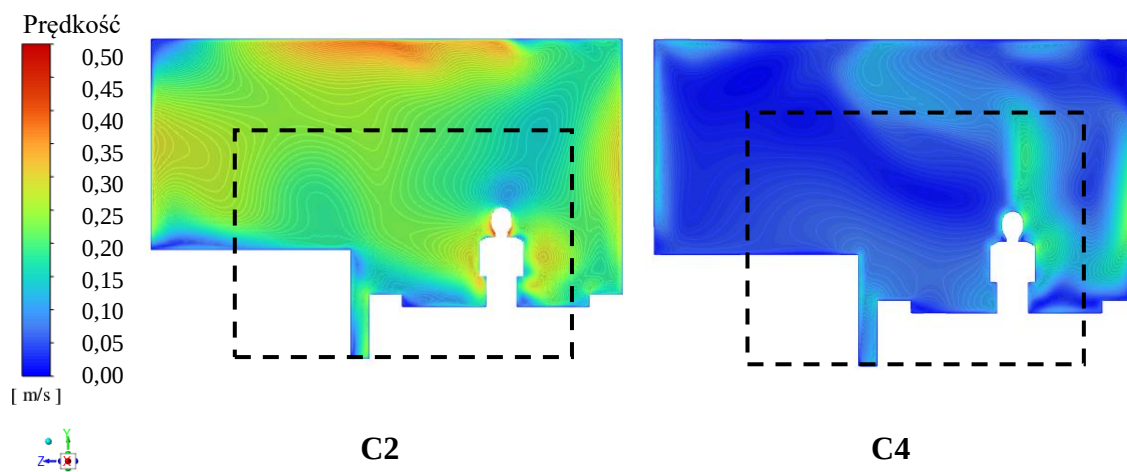
(wysokość głowy) zaobserwowano strefy z prędkością powietrza do 2,5 m/s. Były one obecne głównie w środkowej części szerokości pomieszczenia i nie bliżej niż metr od drzwi. W przypadku C4 (przy niskiej prędkości wiatru) na wysokości kostek (Rys. 8.24) zaobserwowano wzrost prędkości powietrza, widoczny na rozkładzie przedstawionym na Rys. 8.23, w kierunku otwartych drzwi. Natomiast w przypadku C2 przepływ powietrza w kierunku drzwi był wyraźnie niższy w drugiej połowie pomieszczenia, ale nie mniejszy niż 0,05 m/s. W związku z tym, jak można zauważyć, za dość wysoką średnią wartość prędkości powietrza ($v_{sr}=0,38$ m/s) w całej strefie przebywania ludzi miał wpływ obszar oddziaływania strugi występujący jedynie w części pomieszczenia przy oknie.



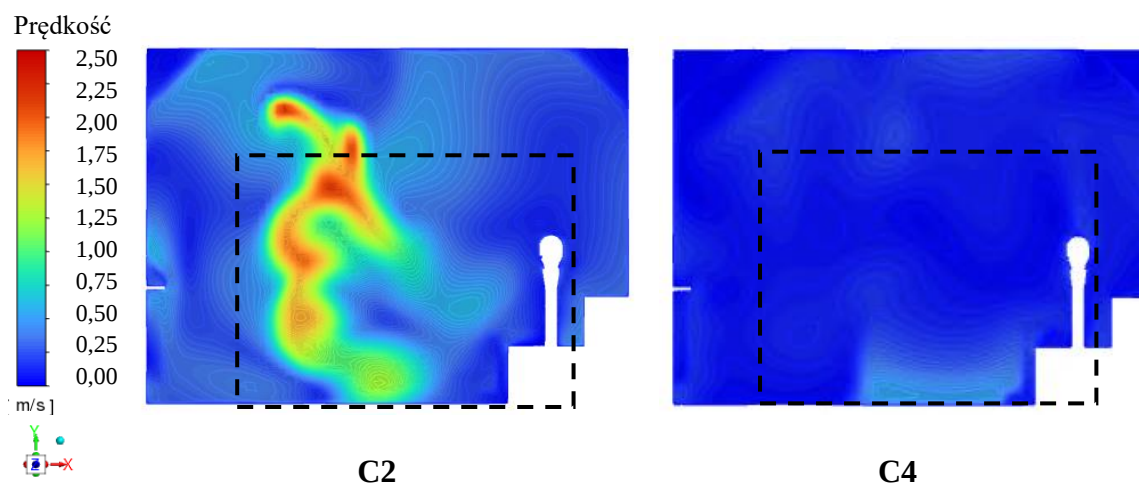
Rys. 8.20. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie YZ, $X = 3$ m dla wariantu C1 i C3 (strefa przebywania ludzi zaznaczona linią czarną przerywaną)



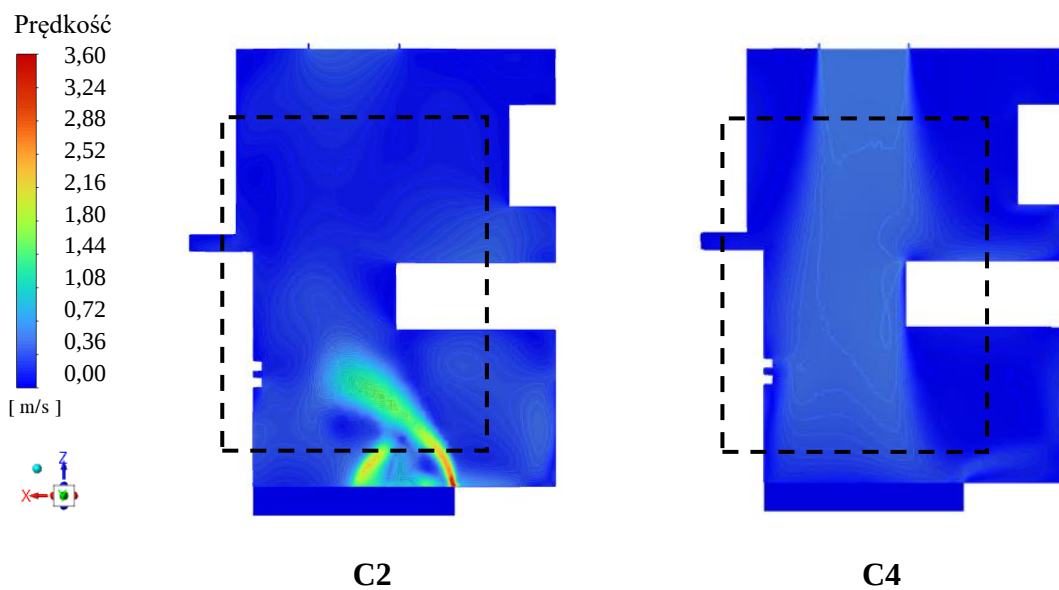
Rys. 8.21. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, $Z = -2,9$ m dla wariantu C1 i C3



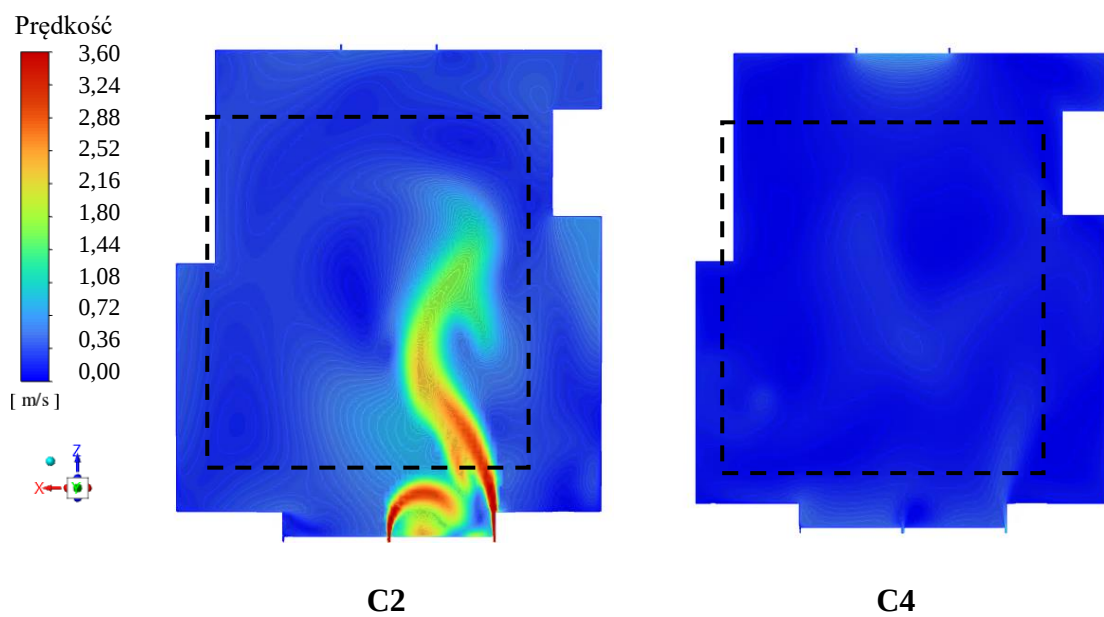
Rys. 8.22. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie YZ, $X = 3$ m dla wariantu C2 i C4



Rys. 8.23. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, $Z = -2,9$ m dla wariantu C2 i C4



Rys. 8.24. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XZ, $Y = 0,1$ m dla wariantu C2 i C4



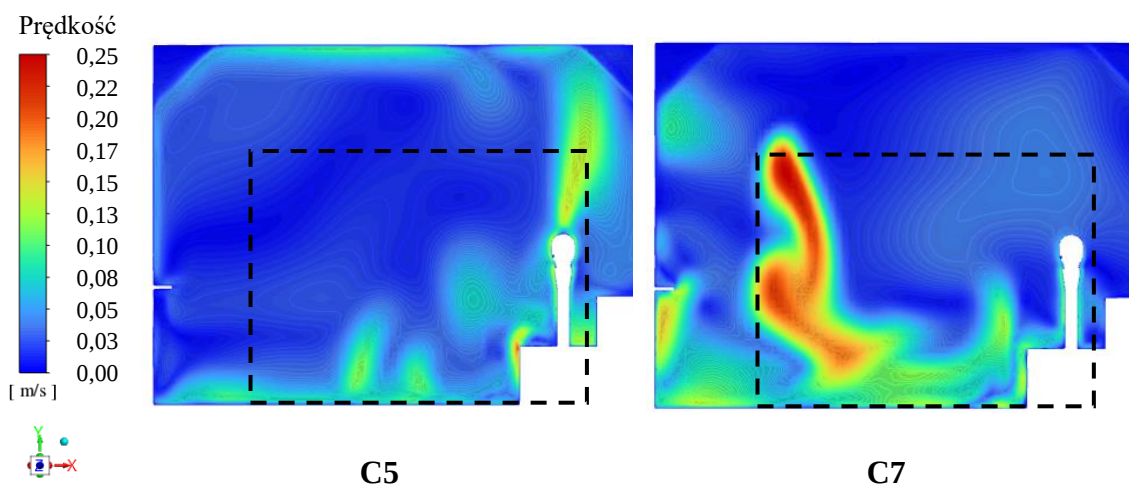
Rys. 8.25. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XZ, $Y = 1,7$ m dla wariantu C2 i C4

8.2.7 Ocena wpływu temperatury powietrza zewnętrznego na warunki środowiska wewnętrznego w ujęciu lokalnym

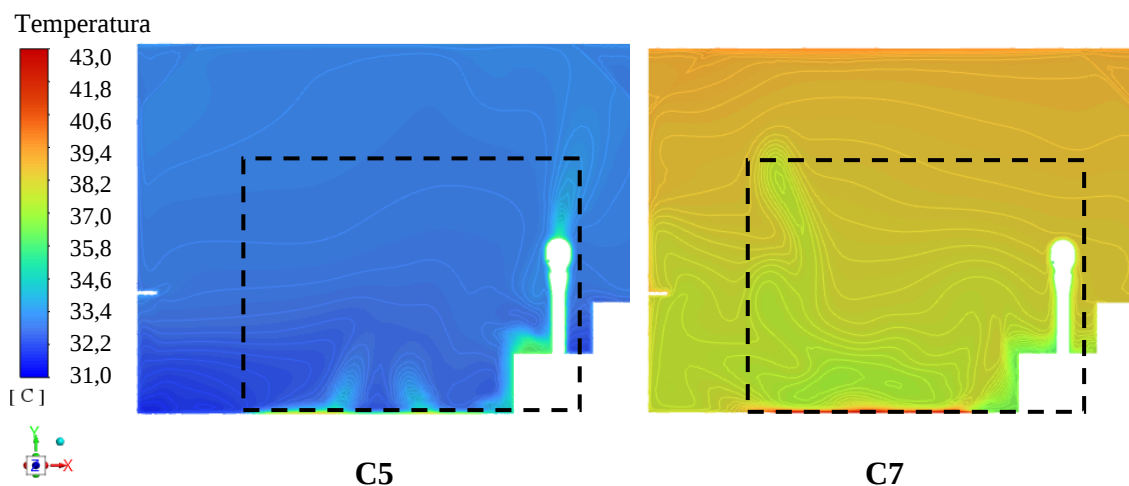
Obliczenia przeprowadzono dla najniekorzystniejszych warunków środowiska wewnętrznego z punktu widzenia temperatury powietrza wewnętrznego w okresie letnim dla klimatu TLM2000 (C5) i 2050 (C7). Dla każdego z wariantów wybrano krok czasowy z maksymalną temperaturą powietrza wewnętrznego przy zamkniętych drzwiach. Analizowano różne konfiguracje otwarcia okna: w wariantcie C5 okno było zamknięte, a w C7 otwarte.

W ekstremalnych warunkach temperatury wewnętrznej średnie wartości parametrów powietrza w pomieszczeniu wyniosły $v_{sr}=0,03$ m/s i $t_{sr}=31,9^{\circ}\text{C}$ dla klimatu teraźniejszego oraz $v_{sr}=0,05$ m/s i $t_{sr}=36,3^{\circ}\text{C}$ dla klimatu 2050. W obu przypadkach udział „martwych stref powietrza” obejmował większość strefy przebywania ludzi 82% i 65%, a temperatura powietrza była wyższa w prawie całej strefie niż zalecana dla II kategorii środowiska wewnętrznego (Tab. 8.15). W wyniku globalnego ocieplenia zaobserwowano wzrost średniej temperatury powietrza o $4,4^{\circ}\text{C}$.

Na Rys. 8.26 i Rys. 8.27 przedstawiono rozkłady parametrów powietrza. Otrzymano przepływy powietrza charakterystyczne dla danej konfiguracji otwarcia okna przy zamkniętych drzwiach. Nie zaobserwowano istotnych zmian w rozkładzie prędkości przy ocieplonym klimacie. W podobnych obszarach jak w pozostałych wariantach z uchylonym oknem występowały strefy z wyższą prędkością powietrza w okolicach wypływu strugi powietrza z okna (ok. 0,20–0,25 m/s) oraz przy kostkach (ok. 0,1 m/s). Uwidocznili się również zakłócenia strumienia konwekcyjnego nad człowiekiem. Pod względem temperatury powietrza zdecydowanie gorsze warunki środowiska cieplnego występowały w ocieplonym klimacie. Za względu na wpływ promieniowania słonecznego zaobserwowano znaczne nagrzanie powierzchni podłogi do nawet $48,9^{\circ}\text{C}$.



Rys. 8.26. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, $Z = -2,9$ m dla wariantu C5 i C7



Rys. 8.27. Rozkład temperatury powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, $Z = -2,9$ m dla wariantu C5 i C7

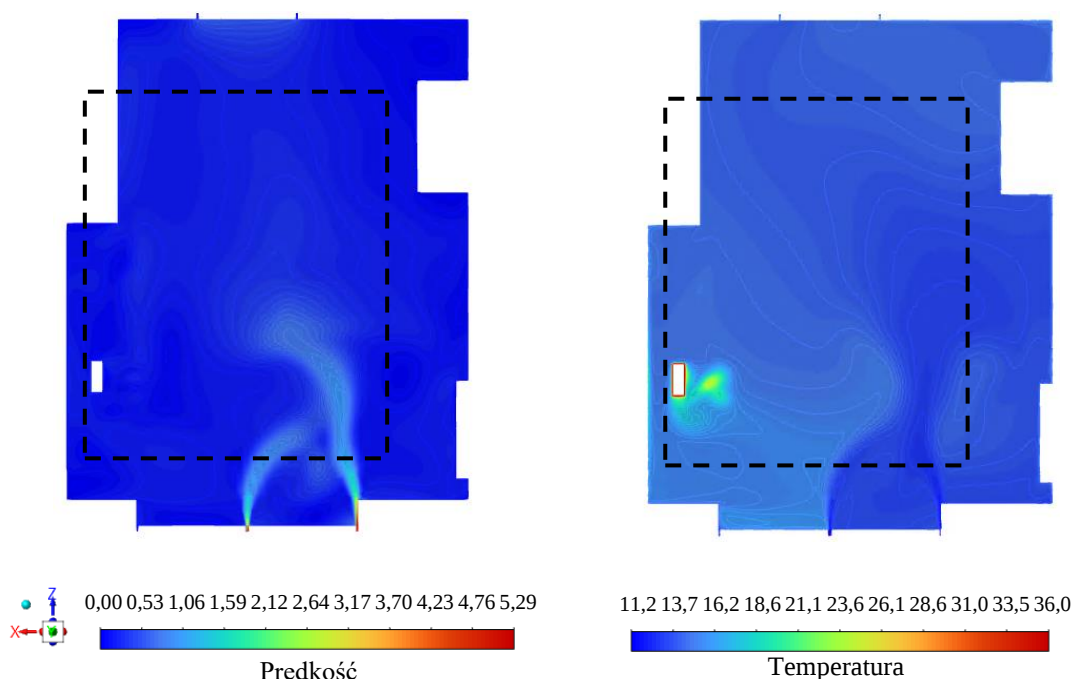
8.2.8 Ocena wpływu wychłodzenia nocnego na warunki środowiska wewnętrznego w ujęciu lokalnym

Obliczenia przeprowadzono dla wariantu C8 z najniższą temperaturą powietrza wewnętrznego uzyskaną w wyniku wychłodzenia pomieszczenia na skutek otwarcia okna przez mieszkańców w godzinach nocnych przy wyłączonym grzejniku. Jednocześnie w tym czasie wystąpiła jedna z najniższych wartości temperatury powietrza zewnętrznego ($t_e = 11,2^\circ\text{C}$), przy której okno było otwarte. Należy zaznaczyć, że w momencie decyzji mieszkańców o zostawieniu uchylonego okna na godziny snu temperatura powietrza zewnętrznego wynosiła powyżej 12°C , czyli spełniała warunek otwarcia okna (rozdz. 8.1.1). Ze względu na to, że wariant został wybrany dla okresu nocnego, a dokładniej dla godz. 3:00, należało założyć pozycję śpiącego człowieka w pomieszczeniu, a nie siedzącego – jak w przygotowanej geometrii modelu. W związku z tym wybrano wysokość, na której potencjalny model śpiącego człowieka by się znajdował, czyli 0,6 m. Na tej wysokości poprowadzono płaszczyznę poziomą przedstawiającą rozkład prędkości i temperatury (Rys. 8.28) oraz jako płaszczyznę pionową wybrano przekrój przechodzący przez środek pomieszczenia obejmujący skrajną część sofy, gdzie mogłaby się znajdować głowa człowieka (Rys. 8.29). Wartość wskaźnika DR obliczono dla wysokości 0,6 m.

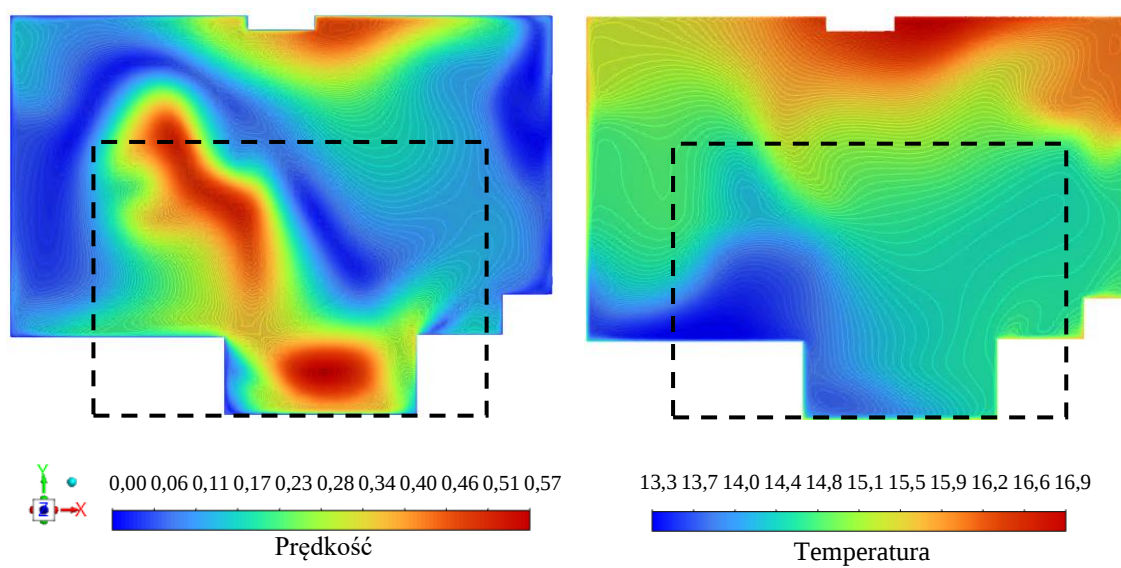
Ze względu na wysoką wartość liczby wymian powietrza ($N = 18,3 \text{ h}^{-1}$) w większości pomieszczenia nie występowały „martwe strefy powietrza”. Wzmógł się przepływ powietrza występował jedynie w osi wypływu strugi powietrza z okna (Rys. 8.28) oraz przy podłodze i suficie w okolicach $v_i = 0,38\text{--}0,51 \text{ m/s}$ (Rys. 8.29). Wartości prędkości powyżej 1 m/s wystąpiły w odległości nie większej niż 0,6 m, czyli poza granicami strefy przebywania ludzi. Ryzyko powstania przeciągu w pobliżu śpiącego człowieka było znikome, potwierdza to zerowa wartość wskaźnika DR. Średnia wartość prędkości w okolicach sofy wynosiła w granicach $0,12\text{--}0,22 \text{ m/s}$, a dla całej płaszczyzny na wysokości 0,6 m wynosiła $v_i = 0,24 \text{ m/s}$.

W pomieszczeniu warunki środowiska cieplnego były złe, nie spełniały wymagań II kategorii. Średnia wartość temperatury powietrza wynosiła $t_{sr}=16,5^{\circ}\text{C}$, a minimalna tylko $t_{min}=12,7^{\circ}\text{C}$ w strefie przebywania ludzi. Otrzymano nierównomierny rozkład temperatury (Rys. 8.29) z wyższymi wartościami – w górnej części w granicach $15,3\text{--}16,9^{\circ}\text{C}$ i niższymi – w dolnej około $14\pm 0,7^{\circ}\text{C}$, szczególnie z lewej części bezpośrednio narażonej na przepływ strugi powietrza z okna. Ze względu na to, że tylko lewa część okna (patrząc od środka) była uchylona, śpiący człowiek odczuwałby w mniejszym stopniu przepływ strugi chłodnego powietrza. Potwierdza to również rozkład temperatury przedstawiony Rys. 8.28. Wartość temperatury powietrza w pobliżu sofy wynosiła około $15\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, a po przeciwległej stronie w około $13,5\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Podsumowując, należy zauważyć, że uzyskane warunki środowiska wewnętrznego były niesatysfakcjonujące ze względu na zbyt niską wartość temperatury powietrza wewnętrznego. Natomiast wartości prędkości powietrza uzyskano na akceptowalnym poziomie. Jednak należy mieć na uwadze fakt, że miejsce do spania (sofa) nie było bezpośrednio narażone na przepływ strugi powietrza z uchylonego okna, w którym wartości prędkości były wyższe przy jeszcze niższej wartości temperatury powietrza. Gdyby sofa była zlokalizowana na przeciwległej ścianie, odczucia dyskomfortu ludzi mogłyby być większe.



Rys. 8.28. Rozkład prędkości i temperatury powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XZ, $Y = 0,6$ m dla wariantu C8



Rys. 8.29. Rozkład prędkości i temperatury powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, $Z = -2,06$ m dla wariantu C8

9 Analiza kosztów środowiskowych

Wykonano analizę kosztów środowiskowych stosowanych systemów HVAC. Oceny wpływu środowiskowego dokonano tylko dla etapu użytkowania, na którym powstaje aż 90% wszystkich negatywnych oddziaływań na środowisko w cyklu życia budynku [148].

Analizę kosztów środowiskowych wykonano, porównując emisję ditlenku węgla w zależności od stosowanego źródła ciepła i sposobu chłodzenia. Na podstawie zużycia energii obliczono emisję ditlenku węgla E_{CO_2} dla poszczególnych wariantów studium przypadku. Nie obliczano emisji ditlenku węgla dla przypadków z idealnym systemem ogrzewania i chłodzenia, dla którego wynikiem było jedynie zapotrzebowanie na ciepło/chłód, a nie zużycie energii. Wielkość emisji CO_2 pochodzącej z procesu spalania paliw przez system ogrzewania i chłodzenia wyznaczono na podstawie wzorów (15) i (16):

$$E_{CO_2,H} = 36 \cdot 10^{-7} \cdot Q_{k,H} \cdot W_{e,H} \quad (15)$$

$$E_{CO_2,C} = 36 \cdot 10^{-7} \cdot Q_{k,C} \cdot W_{e,C} \quad (16)$$

gdzie:

$E_{CO_2,H}$ – wielkość emisji CO_2 pochodzącej z procesu spalania paliw przez system ogrzewania, t CO_2 /rok, $E_{CO_2,C}$ – wielkość emisji CO_2 pochodzącej z procesu spalania paliw potrzebnej do wytworzenia energii elektrycznej dla odbiorców końcowych do zasilania systemu chłodzenia, t CO_2 /rok, $Q_{k,H}$ – roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczaną do budynku dla systemu ogrzewania (zużycie ciepła), kWh/rok, $Q_{k,C}$ – roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczaną do budynku dla systemu chłodzenia (zużycie chłodu), kWh/rok, $W_{e,H}$ – wskaźnik emisji CO_2 w zależności od spalanego paliwa przez system ogrzewania wyznaczony na podstawie danych Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE) [227], t CO_2 /TJ, $W_{e,C}$ – wskaźnik emisji CO_2 w zależności od spalanego paliwa przez system chłodzenia wyznaczony na podstawie danych KOBiZE [228], t CO_2 /TJ.

W przypadku wskaźnika emisji dla biomasy przyjęto wartość bezpośredniej emisji ditlenku węgla do atmosfery w celach porównawczych. Nie wzięto pod uwagę zasad ustalonych w systemie handlu uprawnieniami, gdzie przyjmuje się zerową wartość wskaźnika emisji, aby zachęcić przedsiębiorstwa do wyboru odnawialnego źródła ciepła, którego znaczna część jest marnowana w Polsce [229, 230]. Zerowy bilans spalania biomasy zakłada (pomijając czas absorpcji), że ilość CO_2 wprowadzana do atmosfery w trakcie spalania paliwa jest wcześniej pobierana z atmosfery przez rośliny, będące źródłem biomasy, w procesie fotosyntezy.

9.1 Ocena emisji ditlenku węgla przez stosowane systemy HVAC

W Tab. 9.1 przedstawiono zestawienie otrzymanych wartości emisji CO₂ pochodzącej z procesu spalania paliw przez system ogrzewania i chłodzenia wraz z przyjętym wskaźnikiem emisji. Podobnie jak w rozdz. 8.1.7 do analizy wybrano warianty z otwartymi drzwiami. Sam system grzewczy, w sytuacji gdyby okna były zamknięte przez cały czas (wariant 1b), był odpowiedzialny za emisję od 1,11 tCO₂/rok do 4,36 tCO₂/rok. Niezależnie od klimatu największa wartość emisji CO₂ wystąpiłaby przy wyborze kotła elektrycznego, najmniejsza (aż o 3,5 raza) przy kotle gazowym. Przyczyną tak dużej rozbieżności pomiędzy źródłami jest fakt, że w Polsce energia elektryczna powstaje w wyniku spalania węgla w elektrowniach, powodując dużą emisję ditlenku węgla, a dopiero potem jest dostarczana przez sieć do odbiorców końcowych, ponosząc straty. Drugą najmniejszą emisję miała pompa ciepła, potem kocioł węglowy i kocioł na biomasę. Jednak gdyby uwzględniono wartość netto emisji CO₂ (bliską zeru) do atmosfery w wyniku spalania biomasy, to tego typu kocioł wypadł najbardziej korzystnie. W klimacie obecnym wielkości emisji dla poszczególnych źródeł ciepła były przeważnie większe o 3% do 22% niż w klimacie ocieplonym. Jedynie w wariantcie W2b przy wyborze kotła gazowego oraz pompy ciepła wielkość emisji była kolejno mniejsza o 0,07 tCO₂/rok (o 4%) i 0,03 tCO₂/rok (2%) niż w klimacie 2050.

Tab. 9.1. Zestawienie emisji ditlenku węgla wraz ze wskaźnikiem emisji CO₂ dla wariantów studium przypadku

Klimat	Paliwo	W _e	1b	2b		4	5a	5b	5c	6
			$E_{CO_2,h}$	$E_{CO_2,h}$	$E_{CO_2,c}$	$E_{CO_2,h}$	$E_{CO_2,h}$	$E_{CO_2,h}$	$E_{CO_2,h}$	$E_{CO_2,h}$
TLM2000	Gaz ziemny	57,65	1,24	1,26	0,39	1,40	2,08	2,13	1,96	1,36
	Węgiel kamienny	104,53	2,63	2,67	0,39	2,97	4,40	4,51	4,16	2,87
	Biomasa	124,65	3,67	3,73	0,39	4,16	6,15	6,30	5,81	4,01
	Energia elektryczna (kocioł)	211,39	4,36	4,43	0,39	4,93	7,30	7,48	6,90	4,76
	Energia elektryczna (pompa ciepła)	211,39	1,59	1,62	0,39	1,80	2,67	2,73	2,52	1,74
2050	Gaz ziemny	57,65	1,11	1,12	0,60	1,29	1,63	1,69	1,60	1,26
	Węgiel kamienny	104,53	2,35	2,37	0,60	2,74	3,45	3,58	3,39	2,66
	Biomasa	124,65	3,29	3,31	0,60	3,83	4,82	5,00	4,73	3,72
	Energia elektryczna	211,39	3,90	3,92	0,60	4,55	5,73	5,93	5,62	4,42
	Energia elektryczna (pompa ciepła)	211,39	1,43	1,43	0,60	1,66	2,09	2,17	2,05	1,61

Porównując ze sobą całkowitą wielkość emisji CO₂ powstającej przy konwencjonalnym chłodzeniu (W2b) i chłodzeniu pasywnym (W4–W6), zauważono, że zawsze lepiej wypada wariant W6 – w zależności od źródła ciepła i klimatu emituje średnio około 10,5% mniej ditlenku węgla. Wariant W4 również jest przeważnie bardziej przyjazny dla środowiska, poza dwoma źródłami ciepła (biomasą i energią elektryczną w klimacie TLM2000), gdzie

emituje o 1% i 2% więcej ditlenku węgla. Natomiast w wariantach W5a–W5c powstaje więcej ditlenku węgla, poza przypadkiem z pompą ciepła w klimacie TLM2000. Największe oszczędności w emisji wystąpiły właśnie dla pompy ciepła i sięgały nawet kolejno dla klimatu obecnego i prognozowanego 27% i 21% w wariancie W6.

9.2 Ocena możliwości ograniczenia emisji ditlenku węgla przez zastosowanie paneli fotowoltaicznych

W celu ograniczenia emisji ditlenku węgla powstającej w wyniku wytworzenia energii elektrycznej zasilającej m.in. klimatyzatory (wariant 2b) oraz pompę ciepła zaproponowano zamontowanie paneli fotowoltaicznych na dachu.

Do analizy wybrano dwa przypadki:

- Wariant 2b z kotłem gazowym (ze względu na najmniejszą emisję CO₂) – PV1;
- Wariant 2b z pompą ciepła (typowe rozwiązanie w budynkach jednorodzinnych z panelami fotowoltaicznymi) – PV2.

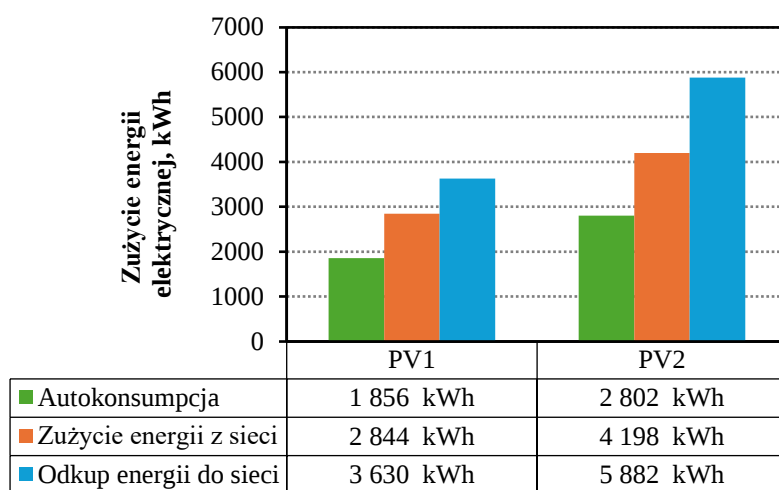
Do przeprowadzenia oceny przyjęto następujące założenia:

- szacunkowe roczne zużycie energii elektrycznej z pozostałych urządzeń wyniosło 3500 kWh;
- rozliczenie kosztów przyjęto zgodnie z obowiązującym systemem Net-billing [231];
- wielkość wskaźnika autokonsumpcji przyjęto na podstawie symulacji producenta (załącznik nr 3);
- ceny sprzedaży energii (wartość brutto) określono jako średnią ceny energii elektrycznej dla odbiorcy w gospodarstwie domowym uwzględniającą opłatę za świadczenie usługi dystrybucji energii elektrycznej obliczonej na podstawie cen zawartych w umowach kompleksowych w roku 2023 wg Informacji Prezesa URE nr 20/2024 [232];
- nie uwzględniono opłat miesięcznych stałych, gdyż są takie same niezależnie od tego, czy budynek jest wyposażony w panele fotowoltaiczne, oraz nie można ich rozliczyć w ramach depozytu prosumenckiego;
- nie uwzględniono kosztów obsługi paneli fotowoltaicznych, tj. przeglądy, naprawy;
- cenę odkupu energii (wartość brutto) określono na podstawie średniej rocznej rynkowych średnich miesięcznych cen energii elektrycznej (RCEm) w 2023 roku [233, 234]. Nie brano pod uwagę obowiązującego od lipca 2024 roku systemu rozliczeń godzinowego, ponieważ brakuje danych z okresu całego roku na moment wykonywania analizy;
- instalacja nie jest wyposażona w magazyn energii.

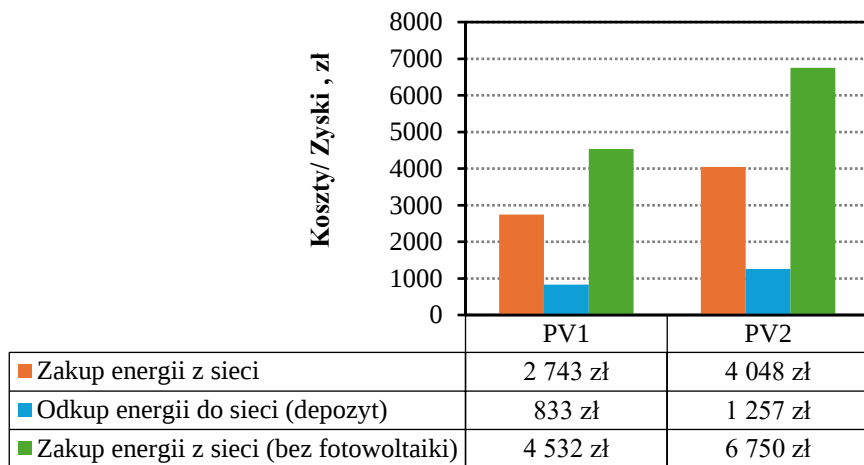
Dobór wielkości instalacji fotowoltaicznej dla wariantów PV1 i PV2 zlecono firmie zewnętrznej. W załączniku nr 3 zamieszczono dokumentację doboru. Wartość rocznego zużycia energii określono na podstawie zużycia energii przez systemy HVAC oraz

pozostałe urządzenia zasilane energią elektryczną. Ze względu na zmienność zużycia w latach założono dodatkową 10-procentową nadwyżkę. Roczne zużycie energii w wariantach PV1 wyniosło 4700 kWh, a w PV2 7000 kWh. Na podstawie rocznego zużycia, parametrów dachu i jego lokalizacji dobrano instalację fotowoltaiczną składającą się z 14 paneli o mocy 435 Wp (PV1) oraz 22 paneli o mocy 435 Wp. Roczny uzysk wyniósł kolejno 5,486 kWh (PV1) i 8685 kWh (PV2). Na Rys. 9.1 przedstawiono bilans energii elektrycznej. Dzięki zastosowaniu paneli fotowoltaicznych udało się ograniczyć roczny pobór energii elektrycznej z sieci o 1856 kWh (PV1) i 2802 kWh (PV2), co stanowi autokonsumpcję energii na poziomie 39% i 40%. W okresie letnim w obu przypadkach wyprodukowano więcej energii niż na dany moment gospodarstwo domowe potrzebowało, nadwyżki 67% i 68% sprzedano z powrotem do sieci. Na Rys. 9.2 przedstawiono podsumowanie kosztów. Dzięki autokonsumpcji i odkupie energii elektrycznej roczne opłaty spadły o 58% i 59%. Należy wspomnieć, że wg systemu Net-bilingu cena odkupu energii do sieci jest zdecydowanie niższa niż sprzedaży przez sieć i ma tendencję spadkową. Stąd pomimo wytworzenia większej ilości energii niż jej zużycia przez gospodarstwo domowe dalej przedsiębiorstwo energetyczne pobiera opłaty, do których dochodzą koszty stałe.

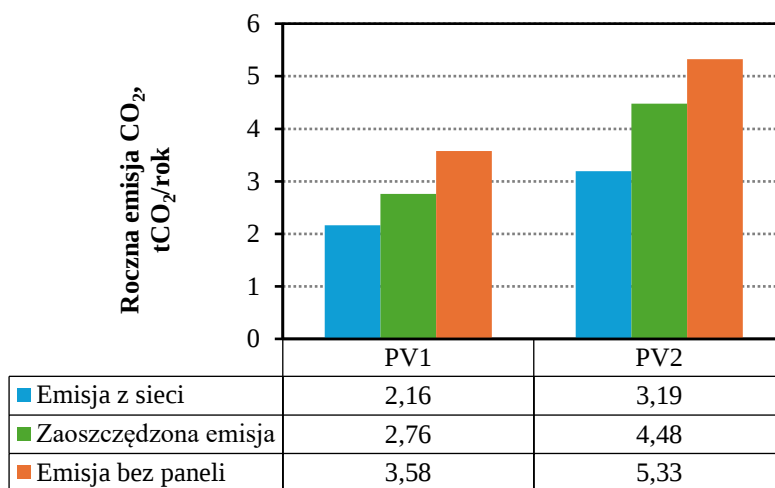
Pod względem ograniczenia emisji CO₂ (Rys. 9.3) instalacja fotowoltaiczna wypadła korzystnie. Poziom emisji dwutlenku węgla powstałego w wyniku produkcji energii elektrycznej dostarczanej do budynku zmniejszył się o 61% (PV1) i 60% (PV2). Natomiast biorąc pod uwagę nadwyżkę wyprodukowanej energii przez panele oddanej do sieci energetycznej, która nie powodowała emisji dwutlenku węgla, budynek okazał się zeroemisyjny. Wielkość emisji z sieci była niższa niż zaoszczędzona emisja przez instalację fotowoltaiczną. Globalnie do środowiska przedostało się mniej dwutlenku węgla o 0,6 tCO₂/rok i 1,28 tCO₂/rok.



Rys. 9.1. Bilans energii elektrycznej przy zastosowaniu paneli fotowoltaicznych



Rys. 9.2. Bilans kosztów za energię elektryczną przy zastosowaniu paneli fotowoltaicznych



Rys. 9.3. Bilans emisji ditlenku węgla [tCO₂/rok] przy zastosowaniu paneli fotowoltaicznych

10 Dyskusja

Proponowane sposoby pasywnego chłodzenia budynków przy wykorzystaniu naturalnego chłodu powietrza zewnętrznego realizowanych przez ręczne bądź automatyczne otwieranie okien pozwoliły na zapewnienie warunków komfortu mieszkańców przez znaczną część okresu chłodzenia.

Wśród omawianych sposobów pasywnego chłodzenia najlepszą efektywność zarówno pod kątem zużycia energii, emisji CO₂, jak i zapewniania warunków komfortu cieplnego mieszkańcom wykazał system z automatycznym otwieraniem okien (wariant W6). Przewagę systemów automatycznych nad manualnymi potwierdzają wyniki uzyskane w literaturze [84, 86]. Wypada on jedynie nieznacznie gorzej niż system z chłodzeniem mechanicznym, który zapewnia komfortowe warunki cieplne przez cały sezon chłodniczy. A biorąc pod uwagę całkowite zużycie ciepła i chłodu okazał się być systemem o lepszej efektywności energetycznej (Rys. 8.9) przy większości źródeł ciepła (Tab. 8.8). Również miał najmniejszy wpływ na środowisko zewnętrzne pod względem emisji ditlenku węgla. Co prawda do zasilania siłowników jest również potrzebna energia elektryczna, ale jej ilość jest nieporównywalnie mniejsza. Szacunkowe roczne zużycie energii elektrycznej przez siłowniki (obliczone na podstawie danych producenta [235], klimat TLM2000, otwarte drzwi) wyniosło nieco ponad 0,5 kWh, czyli było niemal 1000-krotnie mniejsze niż zużycie energii przez klimatyzatory. Natomiast wzrost emisji CO₂ w porównaniu z wariantem z ręcznym otwieraniem (W4) był znikomy, wyniósł tylko 0,4 kgCO₂/rok. Co więcej, zamiast zasilanych elektrycznie siłowników można zastosować solarne. W oknach należałoby zamontować ogniwa automatycznie ładujące akumulator energią słoneczną. Rozwiązania z automatyką okienną powoli są wprowadzane na rynek [236, 237]. Przykładowo producent okien dachowych Velux ma w swojej ofercie elektryczne okna dachowe [238], które mają możliwość sterowania otwarciem w zależności od temperatury powietrza wewnętrznego, wilgotności względnej, stężenia CO₂. Parametry powietrza określa użytkownik za pomocą dedykowanej aplikacji. Za pomiar ich odpowiadają wewnętrzne czujniki klimatu znajdujące się w pomieszczeniach. Dodatkowo okna są wyposażone w rolety zewnętrzne, które są zasłaniane, gdy natężenie oświetlenia dziennego jest zbyt wysokie oraz w czujnik deszczu, automatycznie zamykający okna w razie jego wystąpienia [236]. Koszt takiego systemu wraz z oknami dla poddasza w obiekcie wybranym do niniejszych badań (5 pomieszczeń z oknami dachowymi) to około 53 000 zł brutto. Dla porównania komplet z średniej półki cenowej klimatyzatorów typu Split do pokoi na poddaszu (sypialnia, pokoju 1 i 2) to koszt około 15 000 zł brutto; do tego należałoby doliczyć koszt okien dachowych (około 15–20 tys. zł brutto). Należy pamiętać, że na etapie eksploatacji koszty utrzymania klimatyzacji mogą być zdecydowanie wyższe.

Otwieranie okien przez mieszkańców było mniej efektywne niż automatyczne zarówno pod względem zapewnienia komfortu oraz wymaganej wymiany powietrza, jak i ograniczenia zużycia energii. Dodatkowo zaobserwowano, że wprowadzenie do obliczeń prawdopodobieństwa otwarcia/zamknięcia okna, nawet tylko 75%, znacząco osłabiło efektywność pasywnego chłodzenia oraz zwiększyło zużycie ciepła. Wydaje się być jednak zasadnym analizowanie scenariuszy z prawdopodobieństwem, ponieważ założenie, że

zawsze mieszkańcy zachowują się zgodnie z oczekiwaniami, jest nierealne. Jak wskazuje przegląd badań z tematyki pasywnego chłodzenia [45], odwzorowanie rzeczywistego modelu otwierania okien przez mieszkańców przysparza wielu trudności, gdyż ludzie decyzję o otwarciu bądź zamknięciu okna podejmują nie tylko na podstawie odczuć cieplnych, ale też ze względu na wilgotność powietrza czy poziom CO₂ oraz indywidualne preferencje. Dlatego kolejne badania należałoby poszerzyć o dodatkowe kryteria. Poza wymienionymi należałoby uwzględnić czynniki środowiska zewnętrznego: stężenie zanieczyszczeń powietrza i hałas. Uwzględnienie prawdopodobieństwa pozwoliło chociaż w niewielkim stopniu urealnić wyniki. W przypadku otwierania okien automatycznie można rozważyć zmianę kroku czasowego z 15 minutowego na godzinowy, po którym okno może być zamknięte bądź otwarte. Jak pokazują uzyskane przebiegi zmienności temperatury i liczby wymian w pomieszczeniu (Rys. 8.7), takie wahania o dużej częstotliwości nie poprawiają znacząco efektywności systemu, a wprowadzają niepotrzebne zamieszanie w życiu codziennym mieszkańców (hałas, zmiany w przepływie powietrza) oraz skracają żywotność sprzętu.

Systemy pasywne pod względem zapewnienia wymiany powietrza w pomieszczeniu w granicach wymaganych wykazały się umiarkowaną efektywnością. Pokazują to wyniki otrzymane w efekcie analizy w rozdz. 8.1.4. W godzinach z zamkniętymi oknami liczba wymian powietrza była skrajnie niska, a przy uchylonych oknach zdarzały się w okresy, w których przewyższała wartość 10 h⁻¹, szczególnie w pokoju 1, nawet gdy w pomieszczeniach drzwi były zamknięte. Średnio przez 23% (W4), 44% (W5a), 43% (W5b), 38% (W5c), 31% (W6) czasu wartość liczby wymian powietrza mieściła się w zakresie zapewniającym komfort mieszkańcom (Tab. 8.6, Tab. 8.7). Co warto podkreślić, większym wyzwaniem do poprawy okazała się zbyt niska wartość wymiany powietrza występująca średnio od 49% do 73% czasu w okresie chłodzenia niż zbyt wysoka jej średnia wartość pojawiająca od 3% do 7% czasu. Jednak taki sam problem wystąpił również przy chłodzeniu mechanicznym, nawet w większym stopniu. W związku z tym nie można uznać tego za wadę w porównaniu z budynkiem mechanicznie chłodzonym (wariant W2b). W celu zwiększenia przepływu powietrza w pomieszczeniu w godzinach z zamkniętymi oknami należałoby rozważyć zamontowanie nawiewników okiennych. Zaproponowany w niniejszej pracy system sterowania był stosunkowo prosty do zastosowania w praktyce. Opierał się na pomiarze temperatury powietrza zewnętrznego i wewnętrznego za pomocą często stosowanych w budynkach czujników. Dodatkowo wymagany był czujnik deszczu, już na ten moment stosowany w oknach Velux. Założono także, że w sytuacji wystąpienia wiatru o prędkości przekraczającej 10 m/s mieszkańcy sami zamknęli okna. Natomiast sterowanie nie obejmowało kontroli liczby wymian w pomieszczeniu, przez to pojawiały się okresy z bardzo wysoką wymianą powietrza, powodujące powstawanie ryzyka przeciągu. Niestety pośredni pomiar wymiany powietrza zdecydowanie komplikowałby system, mógłby się opierać na pomiarze prędkości wiatru i różnicy temperatury między powietrzem zewnętrznym i wewnętrznym, co znacznie podniosłoby koszty systemu. W literaturze można spotkać podejścia do modelowania otwierania okien o podobnych kryteriach jak w niniejszej pracy [67] lub w oparciu o wyznaczaną pośrednio temperaturę operatywną w pomieszczeniu na podstawie pomiaru

temperatury powietrza wewnętrznego i promieniowania [91, 92]. Czasem decyzja o otwarciu okna była również podejmowana na podstawie poziomu CO₂ [91, 93] lub wykorzystano rozbudowany algorytm bazujący na modelu predykcyjnym, uczący się na podstawie wyników z pomiarów wykonywanych ciągle [93]. Jednak w żadnej z przytoczonych prac nie zaproponowano rzeczywistego systemu z czujnikami liczby wymian w pomieszczeniu/ bądź miernikami prędkości wiatru.

Pewne ograniczenia i wady pasywnego sposobu chłodzenia w budynku jednorodzinnym podkreśliły również wyniki prognozowania numerycznego CFD. Te analizy uwydatniły różnice w ocenie warunków komfortu ciepłego w ujęciu globalnym i lokalnym.

Pierwszym czynnikiem wpływającym na efektywność systemu w ujęciu lokalnym jest prędkość i kierunek wiatru. Przy bezwietrznej pogodzie, występującej w ponad 12% okresu chłodzenia (Rys. 6.9), przepływ powietrza w pomieszczeniu występował w ograniczonym stopniu, głównie w okolicy okna i w dolnej części pomieszczenia oraz występowały tam wyższe wartości temperatury powietrza. W większości strefy przebywania ludzi prędkość powietrza była skrajnie niska, poniżej minimalnej wartości 0,05 m/s. W celu zwiększenia przepływu powietrza zaproponowano otwarcie drzwi wewnętrznych, co spowodowało ograniczenie udziału „martwej strefy powietrza” do 26% przestrzeni oraz spadek temperatury wewnętrznej. Jednak dalej w ponad 1/4 strefy przebywania ludzi przepływ powietrza był za niski. Natomiast przy wysokiej prędkości wiatru udział martwej strefy powietrza obejmował ponad 1/8 przestrzeni. Warto zwrócić uwagę, że przy zamkniętych drzwiach w pomieszczeniu wielkość „martwej strefy powietrza” utrzymywała się na podobnym poziomie niezależnie od wartości prędkości wiatru. Jedynie przy otwartych drzwiach stwierdzono korzystny wpływ oddziaływania wiatru na warunki środowiska wewnętrznego. Rozwiązaniem problemu mogłoby być zamontowanie wentylatorów sufitowych w pomieszczeniach wymuszających ruch powietrza, stosowanych np. w pracy Daniela [62]. Jednak wiązałoby się to z dodatkowym zużyciem energii i wzrostem emisji ditlenku węgla. Samo otwarcie drzwi wewnętrznych poza opisanymi zaletami powodowało także wzrost ryzyka przeciągu. W rozpatrywanych wariantach wskaźnik DR zawsze mieścił się w dopuszczalnych granicach, ale wyraźnie wzrastał o nawet 7,8 punktów procentowych w porównaniu z wariantami z zamkniętymi drzwiami (Tab. 8.15). Obserwując rozkłady prędkości, można stwierdzić, że gdyby człowiek znajdował się w innej części pomieszczenia, wartości wskaźnika DR byłyby zdecydowanie wyższe. Analizując wpływ zastosowania wentylacji jednostronnej i poprzecznej na rozkład temperatury powietrza, stwierdzono niższe wartości temperatury oraz mniejszą stratyfikację jej rozkładu przy otwartych drzwiach.

Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na rozkład parametrów powietrza w pomieszczeniu jest klimat zewnętrzny. Jak pokazała analiza przeprowadzona w rozdz. 8.2.7, przy wyższej temperaturze powietrza zewnętrznego (w klimacie prognozowanym na 2050 rok) trudniej będzie zapewnić warunki środowiska ciepłego w granicach II kategorii. Natomiast zarówno w klimacie obecnym, jak i prognozowanym na 2050 rok występują podobne problemy z przepływem powietrza w pomieszczeniu.

Ważnym aspektem poruszonym w ramach modelowania CFD była ocena efektywności pasywnego chłodzenia pod względem zapewnienia temperatury powietrza w granicach II kategorii środowiska w całej strefie przebywania ludzi. Na podstawie analizy wariantów C2 i C6, w których zgodnie z wynikami symulacji energetycznych średnia wartość temperatury operatywnej mieściła się w zakresie II kategorii środowiska, stwierdzono zadowalającą efektywność. W omawianych wariantach w prawie całej strefie przebywania ludzi (powyżej 85%) wartości temperatury powietrza również były w zalecanym zakresie, co oznacza, że zdefiniowane kryterium zapewnienia komfortu cieplnego mieszkańców H_{dys} w ujęciu globalnym jest wiarygodne. Analizując warunki cieplne w ujęciu lokalnym, otrzymano podobne wyniki.

Kolejnym aspektem była ocena efektywności chłodzenia pasywnego w godzinach nocnych. Stwierdzono wysoki potencjał możliwości chłodzenia pomieszczeń ze względu na występowanie dużej różnicy w wartościach temperatury powietrza zewnętrznego i wewnętrznego. Niestety niosło to za sobą również negatywny efekt w postaci zbyt niskiej średniej temperatury powietrza w pomieszczeniu ($t_i=16,5^{\circ}\text{C}$) mogącej spowodować u mieszkańców odczucia dyskomfortu. Jednak należy wziąć pod uwagę, że optymalna temperatura snu jest zdecydowanie niższa niż wynikająca bezpośrednio z zakresu komfortu dla modelu adaptacyjnego. Według wytycznych WHO temperatura powietrza w godzinach snu powinna być na poziomie 18°C [239], natomiast amerykańska organizacja National Sleep Foundation podaje nawet zakres od $15,6^{\circ}\text{C}$ do $19,4^{\circ}\text{C}$ [240]. Uwzględniając drugie źródło, można stwierdzić, że średnia wartość temperatury w pomieszczeniu w wariantach C8 spełnia wymagania odpowiednie dla czasu snu. Jednak analiza rozkładu temperatury powietrza, opisana w rozdz. 8.2.8, wskazała lokalne obszary z niższą temperaturą $15,6^{\circ}\text{C}$, występujące głównie w części pomieszczenia bez śpiącego mieszkańca. Można założyć, że przy nieco wyższych wartościach temperatury powietrza zewnętrznego obszary te byłyby mniejsze. Dodatkową zaletą chłodzenia nocnego jest to, że w tym czasie mieszkańcy śpią, a tym samym pozostają w jednym miejscu. Dzięki temu można pozwolić na większy przepływ powietrza w budynku, powodując nawet przeciągi w miejscach bez mieszkańców. W takich sytuacjach ważne jest dobre umiejscowienie łóżek poza bezpośrednim zasięgiem strugi powietrza wpływającego do pomieszczeń, tak jak to miało miejsce w analizowanym modelu. Możliwości chłodzenia nocnego zostały również pośrednio omówione w ramach analizy symulacji cieplnych (Rys. 8.6): zaobserwowano, że nadmierne wychłodzenie pomieszczeń w godzinach nocnych może przyczynić się do lepszych warunków cieplnych w pomieszczeniu w pozostałej części dnia. Wyniki te mają również potwierdzenie w literaturze [88, 106].

W celu potwierdzenia wyników oceny warunków środowiska wewnętrznego należałoby wybrać jeszcze inne pomieszczenia, np. salon, najlepiej zlokalizowane z drugiej strony budynku, tak aby sprawdzić m.in. wpływ usytuowania pomieszczenia względem stron świata (oddziaływania promieniowania słonecznego, wiatru) na efektywność pasywnego chłodzenia.

Warto zwrócić uwagę, że analiza efektywności energetycznej pasywnego chłodzenia nie powinna opierać jedynie na ograniczeniu zużycia chłodu przez jednostki klimatyzacyjne,

ale należy także wziąć pod uwagę ewentualny wzrost zużycia ciepła w systemie ogrzewania. Badania pokazały, że choć chłodzenie pasywne zapewnia warunki środowiska cieplnego w granicach komfortu mieszkańców, to końcowa wartość zużycia energii jest wyższa niż w przypadku budynku z chłodzeniem mechanicznym. Część wyników prezentowanych w literaturze odnosi się jedynie do oszczędności zużycia chłodu, jak np. w pracy Mirakhorli [61], gdzie autor podaje, że wykorzystanie wentylacji naturalnej zmniejsza zużycie energii elektrycznej zasilającej jednostki klimatyzacyjne o 20%. Z kolei w pracy Mushtaha [69] można znaleźć informacje o 59% zmniejszeniu zużycia energii przez ograniczenie zużycia chłodu, ale nie ma odniesienia do zużycia ciepła, podobnie jak w pracy Raji [67], gdzie podaje się jedynie udział procentowy czasu z chłodzeniem mechanicznym. Takie podejście może być stosowne dla analiz w gorących klimatach bez sezonu grzewczego [71]. Wyniki w niniejszej pracy pokazały, że zastosowanie chłodzenia przez otwieranie okien wiąże się ze wzrostem zużycia ciepła, co w pewnym stopniu ogranicza korzystny efekt zrezygnowania z chłodzenia mechanicznego. W porównaniu z budynkiem chłodzonym mechanicznie (wariant W2b) zużycie ciepła (Rys. 8.9) było większe w budynku bez tego systemu odpowiednio dla klimatu TLM2000 i 2050 (otwarte drzwi, kocioł gazowy) o 11%, 16% (W4), 65%, 46% (W5a), 69%, 51% (W5b), 56%, 43% (W5c) i 7%, 13% (W6). Przy czym w tych badaniach przyjęto, że chłodzenie będzie realizowane od maja do września. Gdyby uwzględniono cały rok, to wartość zużycia ciepła wzrosłaby jeszcze bardziej, przykładowo w wariantcie W6 o 217 kWh (TLM2000).

Na wartość zużycia energii ma wpływ także rodzaj zastosowanego źródła ciepła o określonej sprawności (Tab. 8.8). I tak w wariantcie W6 (z siłownikami) największą roczną oszczędność energii otrzymano dla pompy ciepła, która wyniosła odpowiednio w klimacie TLM2000 64% i klimacie prognozowanym 2050 69%, następnie dla kotła elektrycznego 12% i 17%, gazu 9% i 14%. Natomiast dla kotła węglowego i na biomasę całkowite zużycie energii było większe lub takie same jak w przypadku W2b o 4% i 0% oraz 18% i 16%. Większe oszczędności energii wystąpiły w klimacie ocieplonym ze względu na większe potrzeby chłodnicze. Wśród wariantów z ręcznym otwieraniem oszczędność energii odnotowano jedynie przy pompie ciepła: w przypadku W4 wynoszącą 49% i 61%. Należy mieć na uwadze, że w przypadku klimatyzatorów wybrano współczynnik SERR (ang. Seasonal Energy Efficiency Ratio) dla urządzeń o wysokiej klasie efektywności energetycznej. Gdyby założono niższą wartość (gorszy klimatyzator), to stosunek zużycia chłodu do ciepła byłby mniejszy.

W przytoczonym przeglądzie literatury (rozdz. 3) część badań skupiała się na porównaniu za sobą efektywności wentylacji naturalnej jednostronnej z poprzeczną wraz z analizą potencjału wykorzystania jej do chłodzenia budynków [70, 88, 130, 131, 144]. Wszystkie analizy potwierdzają przewagę wentylacji poprzecznej. W niniejszej pracy odpowiedź na to pytanie nie jest jednoznaczna, ponieważ przy niektórych kryteriach oceny (głównie liczbie wymian w pomieszczeniu) korzystniej wypadła wentylacja jednostronna. Poza pokojem 1 czas z wymianą powietrza w granicach II kategorii środowiska był dłuższy przy zamkniętych drzwiach. Do tego ryzyko przeciągu było zdecydowanie niższe. Z drugiej strony przy otwartych drzwiach w przeważającej liczbie porównywanych przypadków struga powietrza wypływająca przez okno w większym stopniu oddziaływała na warunki

środowiska cieplnego, zmniejszając udział „martwej strefy powietrza” oraz liczbę godzin dyskomfortu cieplnego. Natomiast pod względem zużycia ciepła i chłodu bardziej energooszczędna okazała się wentylacja jednostronna (patrz rozdz. 8.1.7). Jednak porównując budynek pasywnie chłodzony z budynkiem chłodzonym mechanicznie, większe oszczędności energii uzyskano przy otwartych drzwiach w klimacie TLM2000 o 2 punkty procentowe i ocieplonym o 3 punkty procentowe (Rys. 8.9).

W dobie ocieplającego się klimatu proponowane rozwiązanie pasywnego chłodzenia w przyszłości będzie niewystarczające. W prognozowanym klimacie na 2050 rok w części pomieszczeń na poddaszu (pokój 1 i 2) temperatura operatywna powietrza będzie za wysoka przez ponad 1/5 czasu przebywania w nich mieszkańców, aby mogła spełnić założone kryteria komfortu (Tab. 8.5). To samo potwierdzają omówione wcześniej wyniki z analizy CFD. W kolejnych dekadach czas dyskomfortu ludzi będzie narastał. Rozwiązaniem tego problemu będzie stosowanie systemów hybrydowych łączących pasywne i mechaniczne rozwiązania oraz wykorzystujących energię odnawialną, zapewniając w ten sposób ograniczenia lub nawet brak emisji CO₂ do atmosfery (patrz rozdz. 9.2).

Dodatkowo podjęto próbę zmiany założonych parametrów opisanych w rozdz. 8.1.1 tak, aby zminimalizować wartość H_{dys} i wykonano dodatkowe obliczenia. Założono, że w sypialni drzwi wewnętrzne będą zamknięte, a w pozostałych pomieszczeniach otwarte oraz w pokojach 1 i 2 zasłonięto rolety zgodnie z przyjętymi założeniami (natężenie promieniowania większe niż 50 W/m² lub gdy temperatura zewnętrzna przekraczała 24°C). Obliczenia przeprowadzono dla wariantu W6, jednak zaproponowane zmiany nie przyniosły korzystnych efektów, a wręcz zwiększyły liczbę godzin dyskomfortu o 1 do 2 punktów procentowych. Wyniki potwierdzają, że przyjęte w tych badaniach założenia do obliczeń były prawidłowe.

Na koniec warto zwrócić uwagę, że otrzymane wyniki badań można uogólniać do obszarów świata o zbliżonym klimacie i dla budynków o podobnej charakterystyce pod względem konstrukcji, kształtu czy systemów HVAC. Jak pokazały badania [121, 122, 241], potencjał chłodzenia wentylacją naturalną jest zależny od warunków pogodowych. Wartości wskaźników efektywności pasywnego chłodzenia są skrajnie różne. Tak samo przy różnej specyfikacji budynków wyniki w zużyciu energii czy emisji CO₂ są różne [242, 243].

11 Podsumowanie i wnioski

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono analizę energetycznej i środowiskowej efektywności konwencjonalnych i pasywnych sposobów chłodzenia budynku jednorodzinnego wyposażonego w różne źródła energii. Głównie skupiono się na ocenie efektywności systemów pasywnych pod kątem zapewnienia komfortu ludzi i zużycia energii na potrzeby ogrzewania, chłodzenia i wentylacji. Następstwem wyznaczenia zużycia energii było określenie emisji ditlenku węgla powstałego w wyniku użytkowania omawianych systemów HVAC.

Przeprowadzony przegląd literatury pozwolił wskazać lukę badawczą, jaką był brak kompleksowej oceny pasywnego chłodzenia nieuzdatnionym powietrzem zewnętrznym budynków mieszkalnych jednorodzinnych realizowanego przez otwieranie okien. Jednocześnie wykazano, że brakuje badań, które uwzględniają zmieniające się wzorce pogodowe oraz zachowanie ludzi i ich wpływ na efektywność systemów ogrzewania, wentylacji i chłodzenia. Takie analizy w oparciu o symulacje BPS i CFD z uwzględnieniem modelowania zmiennego przepływu powietrza zostały przedstawione w ramach niniejszej pracy i stanowią element nowości. Symulacje energetyczne dla całego budynku zostały wykonane w ramach kosymulacji programów EnergyPlus i CONTAM, natomiast prognozowanie numeryczne CFD rozkładu parametrów powietrza w wybranym pomieszczeniu przeprowadzono przy użyciu programu ANSYS Fluent. Istotnym elementem prowadzonych badań było przeprowadzenie badań in-situ w celu oceny rzeczywistych warunków cieplnych i uzyskania danych niezbędnych do wykonania symulacji cieplnych połączonych z modelowaniem wymiany powietrza oraz CFD. Bez nich nie byłaby możliwa do wykonania walidacja potwierdzająca wiarygodność przygotowanych modeli. Należy także podkreślić, że wykonanie badań dotyczących porównania przepływu powietrza przez stosowane w budownictwie mieszkalnym okna o różnym stopniu otwarcia oraz walidacja opisanego modelu w oparciu o wyniki pomiarów wykonanych w rzeczywistym obiekcie stanowią drugi element nowości. Jak wykazały studia literaturowe, do tej pory nie było badań w tym zakresie.

Odnosząc się do celów postawionych z rozdz. 4, stwierdzono, że:

- **cel główny pracy**, jakim była *ocena skuteczności konwencjonalnych i alternatywnych sposobów chłodzenia pomieszczeń w budynku jednorodzinnym z wentylacją naturalną z punktu widzenia zapewnienia komfortu cieplnego mieszkańcom, zużycia energii na potrzeby ogrzewania, chłodzenia i wentylacji oraz emisji gazów cieplarnianych do atmosfery w obecnych i przyszłych warunkach klimatycznych* został zrealizowany przez wykonanie kosymulacji cieplnych połączonych z prognozowaniem numerycznym CFD, metodyka ich przeprowadzenia oraz walidacja została opisana w Rozdziale 6 i Rozdziale 7, a wyniki przedstawiono w Rozdziale 8. Analizę emisji ditlenku węgla przedstawiono w Rozdziale 9. Przeprowadzone badania potwierdziły słuszność podejścia do oceny potencjału chłodzenia pasywnego nie tylko na podstawie wyników otrzymanych w ramach kosymulacji cieplnych, ale także w ramach prognozowania numerycznego. Symulacje CFD umożliwiły bardziej krytyczną ocenę

systemu pod względem rozkładu parametrów powietrza czy ryzyka przeciągu, która nie byłaby możliwa do zrealizowania tylko w oparciu o wyniki BPS. Dzięki niej uwidoczniły się problemy i ograniczenia chłodzenia pasywnego;

- **pierwszy cel szczegółowy** dotyczący *zbadania warunków środowiska wewnętrznego w rzeczywistym domu jednorodzinnym dla oceny skali problemu związanego z zapewnieniem odpowiednich warunków cieplnych w okresie letnim* osiągnięto, przeprowadzając pomiary in-situ wraz z analizą wyników w Rozdziale 5;
- **drugi cel szczegółowy**, jakim było *zbadanie wpływu czynników, tj.: klimatu zewnętrznego (w tym prędkości wiatru), otwarcia drzwi wewnętrznych, zachowania mieszkańców, automatyzacji otwierania okien na warunki cieplne i zużycie energii w budynku*, osiągnięto poprzez analizę wyników w ramach studium przypadku opisaną w Rozdziale 8 oraz ich dyskusję w Rozdziale 10;
- realizacja **trzeciego celu szczegółowego** określonego jako *zbadanie wpływu pasywnego chłodzenia powietrzem zewnętrznym na rozkład parametrów powietrza w pomieszczeniu* zawarta jest w ramach analizy wyników prognozowania numerycznego CFD opisanej w rozdz. 8.2 oraz dyskusję tych wyników w Rozdziale 10;
- **czwarty cel szczegółowy** obejmujący *ocenę emisji ditlenku węgla do atmosfery przy zastosowaniu konwencjonalnych i alternatywnych sposobów chłodzenia oraz dla różnych źródeł energii w systemach HVAC* został opisany w ramach analizy kosztów środowiskowych w Rozdziale 9.

Na podstawie przeprowadzonej analizy i dyskusji wyników wyciągnięto następujące wnioski końcowe:

- I. Chłodzenie pasywne powietrzem zewnętrznym oparte na automatycznym otwieraniu okien jest skutecznym i efektywnym energetycznie sposobem zapewnienia warunków komfortu cieplnego mieszkańcom w budynkach jednorodzinnych. Budynek w takim wypadku zużywa o 9% i 14% mniej energii (odpowiednio w klimacie obecnym i w klimacie prognozowanym na 2050 rok) w porównaniu z budynkiem chłodzonym mechanicznie. Chłodzenie pasywne z automatycznym otwieraniem okien pozwala na osiągnięcie warunków komfortu cieplnego mieszkańców przez przynajmniej 94% czasu w klimacie obecnym. Natomiast w klimacie prognozowanym czas ten wynosi nie mniej niż 87%. Oznacza to, że wraz z ocieplającym się klimatem efektywność pasywnego chłodzenia będzie niższa. Należy rozważyć zastosowanie systemu hybrydowego łączącego chłodzenie pasywne i mechaniczne.
- II. Chłodzenie pasywne powietrzem zewnętrznym oparte na ręcznym otwieraniu okien może być skuteczne, ale ważnym elementem jest odpowiednia edukacja i świadomość mieszkańców z tego zakresu. Częściowe (nawet w 75%) stosowanie się do zasad powoduje zdecydowane pogorszenie warunków panujących w pomieszczeniu, zwiększając udział godzin dyskomfortu o nawet 59 punktów procentowych oraz znaczący wzrost zużycia ciepła o nawet 40%.

- III. Efektywność chłodzenia pasywnego jest silnie zależna od warunków zewnętrznych, takich jak prędkość i kierunek wiatru oraz temperatura powietrza. Przy bezwietrznej pogodzie przepływ powietrza w pomieszczeniu jest znikomy, uniemożliwiając korzystną wymianę powietrza i otrzymanie równomiernego rozkładu temperatury. Natomiast przy dużych wartościach prędkości wiatru, w pomieszczeniu mogą pojawić się obszary ze zbyt wysoką prędkością powietrza sięgającą 2,5 m/s. Przy wysokich wartościach temperatury powietrza zewnętrznego nie jest możliwe utrzymanie temperatury w pomieszczeniu w granicach II kategorii środowiska.
- IV. Otwarcie drzwi wewnętrznych generuje spadek liczby godzin dyskomfortu, ale zwiększa liczbę godzin z dużą wymianą powietrza (powyżej 10 h⁻¹) oraz zwiększa tym samym zużycie ciepła w budynku; wpływa natomiast korzystnie na zmniejszenie udziału „martwej strefy powietrza” i osiągnięcie bardziej jednolitego rozkładu temperatury w pomieszczeniu.
- V. W budynkach mieszkalnych z wentylacją naturalną istnieje problem z dostosowaniem wymiany powietrza w pomieszczeniu w granicach akceptowalnych dla mieszkańców. Przy zamkniętych oknach liczba wymian może być za niska, a przy otwartych i wysokiej prędkości wiatru może być zbyt wysoka, szczególnie w pomieszczeniach na poddaszu nawet do 19% czasu przebywania mieszkańców. W celu ograniczenia zbyt wysokiej wymiany powietrza system automatycznego otwierania okien powinien być wyposażony w układ do kontroli przepływu powietrza.
- VI. W pomieszczeniu wentylowanym naturalnie (w tym z nawiewem powietrza przez otwarte okno) występują obszary z „martwymi strefami powietrza” nawet przy czynnikach zewnętrznych potencjalnie wpływających na ich ograniczenie, jak wysoka prędkość wiatru czy otwarcie drzwi wewnętrznych. W celu ich redukcji można rozważyć zastosowanie wentylatorów sufitowych, przy czym wiązać się to będzie z większym zużyciem energii.
- VII. Wśród omawianych źródeł ciepła, kocioł gazowy cechuje się najmniejszą emisją ditlenku węgla do atmosfery, a największą kocioł elektryczny. Sposobem na redukcję śladu węglowego jest zastosowanie paneli fotowoltaicznych, które w rachunku globalnym umożliwiają rekompensację całej wielkości emisji powstałej przez systemy HVAC, w tym klimatyzatory.

Ograniczenia badań i propozycje dalszych prac

Badania nie uwzględniały innych czynników wewnętrznych i zewnętrznych branych pod uwagę jako kryterium otwarcia okien, tj. wilgotność względna, wymiana powietrza, poziom CO₂, stężenie zanieczyszczeń powietrza zewnętrznego, hałas. Ich brak mógł wpłynąć na ostateczną ocenę efektywności zaproponowanego systemu. Stanowi to propozycję do dalszych badań w tematyce rozprawy. Kolejnym obszarem wymagającym szczegółowych badań jest ocena systemu hybrydowego pod kątem zużycia energii w przyszłych klimatach oraz wpływu zastosowania wentylatorów sufitowych na rozkład parametrów powietrza przy chłodzeniu pasywnym.

Podsumowując, należy jednak zaznaczyć, że przedstawiona praca stanowi kolejny krok w ocenie konwencjonalnych i pasywnych sposobów chłodzenia w kierunku ograniczenia ich negatywnego wpływu na środowisko przy jednoczesnym uwzględnieniu utrzymania warunków komfortu cieplnego mieszkańców.

Bibliografia

- [1] 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 r. poz. 376).
- [2] Ustawa z dnia 17 lipca 2009 o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji (Dz. U. 2013 r. poz. 1107 oraz z 2014 r. poz. 1101).
- [3] J. Kaczmarczyk, *Poradnik diagnostyki cieplnej budynków*, Tom 4, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
- [4] Engineering Reference, EnergyPlus™ Version 9.4.0 Documentation; US Department of Energy: Washington, DC, USA, 2020 [Online]. Dostępny: https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.4.0/EngineeringReference.pdf. [Dostęp: 23.02.2021].
- [5] Input Output Reference — EnergyPlus 9.4 [Online]. Dostępny: <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/9-4/input-output-reference/>. [Dostęp: 18.11.2024].
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Online]. Dostępny: <https://www.ipcc.ch/>. [Dostęp: 14.02.2021].
- [7] T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, i P. M. Midgley, „Summary for policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*,” IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2013.
- [8] H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, i B. Rama, „Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2022.
- [9] „Infografika: Emisje gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej” [Online]. Dostępny: <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20180301STO98928/infografika-emisje-gazow-cieplarnianych-w-unii-europejskiej>. [Dostęp: 20.11.2020].
- [10] *COP24. Cele i zobowiązania Polski, UE i świata na 2030 r.*, Instytut ochrony środowiska – państwowy instytut badawczy, 2019.
- [11] Główny Urząd Statystyczny „Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2017 i 2018”, [Online]. Dostępny: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/gospodarka-paliwowo-energetyczna-w-latach-2017-i-2018,4,14.html>. [Dostęp: 18.11.2024].
- [12] K. Grygierek, *Optymalne kształtowanie zewnętrznej powłoki budynku metodami inteligencji obliczeniowej*. Gliwice, Polska, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2019.
- [13] S. M. Joshi, „The sick building syndrome”, *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 12, nr 2, s. 61–64, 2008, doi: 10.4103/0019-5278.43262.
- [14] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane. (Dz.U. 1994 r. nr 89 poz. 414, z późn. zm.).
- [15] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. (Dz.U. 2002 r. nr 75, poz. 690).
- [16] „Budownictwo w I półroczu 2024 r.”, 2024. [Online]. Dostępny: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/przemysl-budownictwo-srodki-trwale/budownictwo/budownictwo-w-1-polroczu-2024-roku,13,23.html>. [Dostęp: 30.09.2024].
- [17] M. Załęcka-Myszkiewicz, „Współczesne typy i modele zabudowy jednorodzinnej” w *Nowoczesność w architekturze. Integracja – identyfikacja – innowacja*, T. 2.,

- Identyfikacja*, M. Balcer-Zgrai, Red., Gliwice: Wydział Architektury Politechniki Śląskiej, 2013, s. 145-157.
- [18] M. Kaczmarzyk, „Wpływ współczynnika kształtu A/V na wielkość strat ciepła w budynku w świetle rosnących wymogów dotyczących izolacyjności termicznej przegród budowlanych,” *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, vol. 64, nr 2/II, s. 45–54, 2017.
 - [19] W. Marks, „Multicriteria Optimisation of Shape of Energy-Saving Buildings,” *Building and Environment*, vol. 32, nr 4, s. 331–339, 1997.
 - [20] X. Chen, H. Yang, i L. Lu, „A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, s. 1430-1442, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.037>.
 - [21] X. Zhang, H. Yang, i Y. Xu, „Influence of building shape coefficient on energy consumption of office buildings in hot-summer-and-cold-winter area of China,” *Energy and Buildings*, vol. 75, s. 82–90, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.035>.
 - [22] H. Zhang, Y. Pan, i L. Wang, „Influence of plan shapes on annual energy consumption of residential buildings,” *Int. J. Sustainable Dev. Plann.*, vol. 12, nr 7, s. 1178–1191, 2017, doi: <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N7-1178-1191>.
 - [23] X. Shi, Z. Tian, W. Chen, B. Si, i X. Jin, „A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, s. 872–884, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.041>.
 - [24] Ogólna koncepcja budynku pasywnego, [Online]. Dostępny: <https://nape.pl/wp-content/uploads/2020/11/Ogolna-koncepcja-budynku-pasywnego.pdf>. [Dostęp: 18.11.2024].
 - [25] M. Załęcka-Myszkiewicz, „Typologia zabudowy jednorodzinnej,” w *Wiedza i eksperymenty w budownictwie*, J. Bzówka, Red., Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2014.
 - [26] A. Drozd, „Przegrody pionowe w budownictwie mieszkaniowym jednorodzinnym,” *Przegląd Budowlany*, s. 32–37, 2013. [Online]. Dostępny: https://www.przegląd-budowlany.pl/2013/04/2013-04-PB-32-37_Drozd.pdf. [Dostęp: 18.11.2024].
 - [27] A. Baranowska-Drabik i R. Piotrowski, „Kształtowanie i wykonawstwo budynków w konstrukcji lekkiego szkieletu drewnianego,” *Inżynieria i Budownictwo*, vol. 67, nr 4, s. 218–224, 2011.
 - [28] A. Baranowska-Drabik i R. Piotrowski, „Wpływ zmian w technologii budowy domów drewnianych na ich popularność w Polsce,” *Inżynieria i Budownictwo*, vol. 69, nr 5, s. 247–251, 2013.
 - [29] A. Pietrzak, „Technologia wykonania i izolacyjność cieplna domu z bali pełnych,” *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, vol. 1(11), 2023.
 - [30] M. Kowalski, „Technologia wykonywania budynków jednorodzinnych przy użyciu pustaków styropianowych,” *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo*, vol. 20, nr 1, 2014.
 - [31] M3System, „Budujemy domy doskonałe,” [Online]. Dostępny: <https://m3system.pl/>. [Dostęp: 19.11.2024].
 - [32] Główny Urząd Statystyczny, „Raport: Budownictwo w 2021,” [Online]. Dostępny: <https://stat.gov.pl/>. [Dostęp: 19.11.2024].
 - [33] Główny Urząd Statystyczny, „Budownictwo mieszkaniowe 2015,” [Online]. Dostępny: <https://stat.gov.pl/>. [Dostęp: 19.11.2024].
 - [34] Główny Urząd Statystyczny, „Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2018 r.,” [Online]. Dostępny: <https://stat.gov.pl/>. [Dostęp: 19.11.2024].
 - [35] Polski Alarm Smogowy, „Domy jednorodzinne w Polsce: Źródła grzewcze, stan energetyczny, priorytety inwestycyjne,” [Online]. Dostępny: https://polskialarmsmogowy.pl/wp-content/uploads/2021/05/Raport_domy2020_final.pdf. [Dostęp: 19.11.2024].

- [36] Główny Urząd Nadzoru Budowlanego, „Informacje o CEEB,” [Online]. Dostępny: https://www.gunb.gov.pl/sites/default/files/pliki/dokumenty/informacje_o_ceedb.pdf?325. [Dostęp: 19.11.2024].
- [37] Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła [Online]. Dostępny: <https://portpc.pl>. [Dostęp: 30.09.2024].
- [38] Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła, „Czy rok 2024 przyniesie nowe otwarcie polskiemu rynkowi pomp ciepła? Podsumowanie 2023 roku i perspektywy dla branży” [Online]. Dostępny: <https://portpc.pl/czy-rok-2024-przyniesie-nowe-otwarcie-polskiemu-rynkowi-pomp-ciepala-podsumowanie-2023-roku-i-perspektywy-dla-branzy>. [Dostęp: 19.11.2024].
- [39] Główny Urząd Nadzoru Budowlanego, „CEEB - Baza informacji o źródłach ciepła i spalania paliw w Polsce,” [Online]. Dostępny: <https://www.gunb.gov.pl/aktualnosc/ceedb-baza-informacji-o-zrodlach-ciepala-i-spalania-paliw-w-polsce>. [Dostęp: 30.09.2024].
- [40] T. Gaczoł, „Podciśnieniowy i nadciśnieniowy system wentylacji grawitacyjnej,” *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, vol. 33, z. 63, s. 85–93, 2016, doi: <https://doi.org/10.7862/rb.2016.189>.
- [41] A. Bulińska, „Analiza wykorzystania generowanego metabolicznie ditlenku węgla jako znacznika gazowego do określania wymiany powietrza,” Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2016.
- [42] J. Wasiczuk i M. Sobiech, „Jakość powietrza w budynkach mieszkalnych,” *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych*, vol. 1, 2017, s. 3-6.
- [43] K. Kasperkiewicz, „Metoda oceny wentylacji mieszkań w budynkach przed i po termomodernizacji,” *Prace Instytutu Techniki Budowlanej*, nr 1, 2006.
- [44] T. Yang i D. J. Clements-Croome, „Natural Ventilation in Built Environment” w *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, R. A. Meyers, Red., s. 431-464 New York, NY: Springer, 2020.
- [45] D. Bienvenido-Huertas, M. L. Hoz-Torres, A. J. Aguilar, B. Tejedor i D. Sánchez-García, „Holistic overview of natural ventilation and mixed mode in built environment of warm climate zones and hot seasons”. *Building and Environment*, vol. 245, s. 110942, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110942>.
- [46] PN-83/B-03430/Az3:2000, *Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej – Wymagania*, 2000.
- [47] PN-EN 16798-1:2019 -06, *Charakterystyka energetyczna budynków -Wentylacja budynków- Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki – Moduł M1-6*, 2019.
- [48] A. Biała, Analiza porównawcza wentylacji naturalnej i mechanicznej na przykładzie domu jednorodzinnego, *Architectus*, vol. 3 (63), s. 145-160, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2020, doi: <https://doi.org/10.37190/arc200310>.
- [49] Efektywność energetyczna w Polsce – przegląd 2015, [Online]. Dostępny: <https://depot.ceon.pl/bitstream/handle/123456789/13542/Przegl%u0105d-Efektywno%u015Bci-Energetycznej-2015.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. [Dostęp: 19.11.2024].
- [50] M. Zastempowski, „Nowoczesny system wentylacji domu jednorodzinnego w aspekcie jego efektywności energetycznej,” *Inż. Ap. Chem.* vol. 5, s. 271-273, 2012.
- [51] Główny Urząd Statystyczny, „Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2009 r.”, [Online]. Dostępny: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia /energia/zuzycie-energii-w-gospodarstwach-domowych-w-2009-r,2,1.html>. [Dostęp: 19.11.2024].
- [52] Business Insider, „Nie taki straszny, jak o nim mówią – pytamy eksperta o klimatyzator”, [Online]. Dostępny: <https://businessinsider.com.pl/technologie/nowe-technologie/nie-taki-straszny-jak-o-nim-mowia-pytamy-eksperta-o-klimatyzator/fwz5t2p>. [Dostęp: 30.09.2024].

- [53] I. Oropeza-Pezes i P. A. Østergaard, „Active and passive cooling methods for dwellings: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, s. 531-544, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.059>.
- [54] Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej (Dz.U. 2021 r., poz. 2166).
- [55] N. Geetha i R. Velraj. „Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage - a review”, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, vol. 29(2), s. 913-46, 2012.
- [56] R. Pacheco, J. Ordóñez i G. Martínez, „Energy efficient design of building: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, nr. 6, s. 3559–3573, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>.
- [57] K. M. Al-Obaidi, M. Ismail i A. M. Abdul Rahman, „Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review,” *Frontiers of Architectural Research*, vol. 3, nr. 3, s. 283–297, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.06.002>.
- [58] „Ochrona przeciwsłoneczna wewnątrz budynków,” *Builder Polska*, 2015, [Online]. Dostępny: <https://builderpolska.pl/2015/05/22/ochrona-przeciwsłoneczna-wnetrz-budynkow/>. [Dostęp: 20.11.2024].
- [59] A. Waqas i Z. Ud Din, „Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 18, s. 607–625, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.034>.
- [60] Y. Song, K. S. Darani, A. I. Khdaif, G. Abu-Rumman i R. Kalbasi, „A review on conventional passive cooling methods applicable to arid and warm climates considering economic cost and efficiency analysis in resource-based cities,” *Energy Reports*, vol. 7, s. 2784–2820, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.056>.
- [61] A. Mirakhorli, Natural Ventilation in Residential Building in San Antonio Area [Online]. Dostępny: https://www.researchgate.net/publication/319162483_Natural_Ventilation_in_Residential_Building_An_EnergyPlus_simulation_study [Dostęp: 15.10.2021].
- [62] L. Daniel, „‘We like to live in the weather’: Cooling practices in naturally ventilated dwellings in Darwin, Australia,” *Energy and Buildings*, vol. 158, s. 549–557, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.031>.
- [63] R. Yao, B. Li, K. Steemers i A. Short, „Assessing the natural ventilation cooling potential of office buildings in different climate zones in China,” *Renewable Energy*, vol. 34, nr 12, s. 2697–2705, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.015>.
- [64] M. Kolokotroni, M. D. A. E. S. Perera, D. Azzi i G. S. Virk, „An investigation of passive ventilation cooling and control strategies for an educational building,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 21, nr 2, s. 183–199, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/s1359-4311\(00\)00008-9](https://doi.org/10.1016/s1359-4311(00)00008-9).
- [65] T. Hirano, S. Kato, S. Murakami, T. Ikaga, Y. Shiraishi, i H. Uehara, „A study on a porous residential building model in hot and humid regions part 2—reducing the cooling load by component-scale voids and the emission reduction effect of the building model,” *Building and Environment*, vol. 41, nr 1, s. 33–44, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.016>.
- [66] I. Oropeza-Perez i P. A. Østergaard, „Potential of natural ventilation in temperate countries – A case study of Denmark,” *Applied Energy*, vol. 114, s. 520–530, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.008>.
- [67] B. Raji, M. J. Tenpierik, R. Bokel i A. van den Dobbelsteen, „Natural summer ventilation strategies for energy-saving in high-rise buildings: a case study in the Netherlands,” *International Journal of Ventilation*, vol. 19, nr 1, s. 25–48, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/14733315.2018.1524210>.

- [68] Nayara R. M. Sakiyama, Joyce Correna Carlo, J. Frick i H. Garrecht, „Perspectives of naturally ventilated buildings: A review,” vol. 130, s. 109933–109933, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109933>.
- [69] E. Mushtaha, T. Salameh, A. Kharrufa, T. Mori, A. Aldawoud, R. Hamad, T. Nemer, „The impact of passive design strategies on cooling loads of buildings in temperate climate,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, s. 101588, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101588>.
- [70] R. Stasi, F. Ruggiero i U. Berardi, „Natural ventilation effectiveness in low-income housing to challenge energy poverty,” *Energy and Buildings*, vol. 304, s. 113836, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113836>.
- [71] T. Liu, X. Wang i W. L. Lee, „Evaluating the effectiveness of transom window in reducing cooling energy use in high-rise residential buildings in Hong Kong,” *Journal of Building Engineering*, vol. 35, s. 102007, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102007>.
- [72] „WELCOME - Venticool,” *Venticool* [Online]. Dostępny: <https://venticool.eu> [Dostęp: 14.08.2020].
- [73] P. Heiselberg, „EBC Annex 62 Ventilative Cooling Project Summary Report”. [Online]. Dostępny: https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_SR_Annex62.pdf. [Dostęp: 20.11.2024].
- [74] M. Kolokotroni M. i P. Heiselberg, „IEA EBC Annex 62 Ventilative Cooling-State-of-the-Art Review” [Online]. Dostępny: [Venticool.eu/wp-content/uploads/2013/09/SOTAR-Annex-62-FINA.pdf](https://venticool.eu/wp-content/uploads/2013/09/SOTAR-Annex-62-FINA.pdf). [Dostęp: 14.11.2020].
- [75] P. D. O’Sullivan, A. O’Donovan, G. Zhang i G. C. d. Graca, „Design and performance of ventilative cooling: a review of principals, strategies and components from International case studies,” w *38th AIVC Conference "Ventilating healthy low-energy buildings*, Nottingham, Anglia, 2017.
- [76] P. D. O’Sullivan, Guilherme, A. O. Donovan i M. D. Murphy, „Ventilative Cooling In International Case Studies - Lessons Learned,” 27, 2018. https://www.researchgate.net/publication/326016289_Ventilative_Cooling_In_International_Case_Studies_-_Lessons_Learned. [Dostęp: 22.08.2022].
- [77] „Ventilative Cooling Case Studies Energy in Buildings and Communities Programme,” 2018. [Online]. Dostępny: <https://venticool.eu/wp-content/uploads/2016/11/VC-Case-Studies-EBC-Annex-62-May-2018-Final.pdf>. [Dostęp: 22.10.2021].
- [78] Christoffer Plesner i M. Pomianowski, „Status and recommendations for better implementation of ventilative cooling in standards, legislation and compliance tools,” *AIVC*, 10, 2018. <https://www.aivc.org/resource/status-and-recommendations-better-implementation-ventilative-cooling-standards-legislation>. [Dostęp: 30.11.2024].
- [79] „Ventilative Cooling Sourcebook Energy in Buildings and Communities Programme,” 2018. [Online]. Dostępny: <https://venticool.eu/wp-content/uploads/2016/11/VC-Sourcebook-EBC-Annex-62-March-2018.pdf>. [Dostęp: 30.11.2024].
- [80] „Ventilative Cooling Design Guide Energy in Buildings and Communities Programme,” 2018. [Online]. Dostępny: <https://venticool.eu/wp-content/uploads/2016/11/VC-Design-Guide-EBC-Annex-62-March-2018.pdf>. [Dostęp: 24.01.2023].
- [81] A. Belleri, G. Chiesa i P. Di Torino, „IEA -EBC Programme -Annex 62 Ventilative Cooling Ventilative Cooling potential tool User guide.” [Online]. Dostępny: https://venticool.eu/wp-content/uploads/2016/11/Ventilative-cooling-potential-tool_User-guide.pdf. [Dostęp: 30.11.2024].
- [82] W. Yin, G. Zhang, W. Yang i X. Wang, „Natural ventilation potential model considering solution multiplicity, window opening percentage, air velocity and humidity in China,” *Building and Environment*, vol. 45, nr 2, s. 338–344, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.012>.

- [83] I. Sarna, J. Ferdyn-Grygierek i K. Grygierek, „Assessment of energy demand and thermal comfort in a single-family building in different climate conditions,” w *Proceedings of the 6th International Conference Contemporary Problems of Thermal Engineering : CPOTE 2020, Poland, 21-24 September 2020*. [Dokument elektroniczny], W. Stanek, P. Gładysz, S. Werle i L. Czarnowska, Red., 2020, s. 1151–1162.
- [84] K. Grygierek i I. Sarna, „Impact of Passive Cooling on Thermal Comfort in a Single-Family Building for Current and Future Climate Conditions,” *Energies*, vol. 13, nr 20, s. 5332, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/en13205332>.
- [85] J. Ferdyn-Grygierek, I. Sarna i K. Grygierek, „Effects of Climate Change on Thermal Comfort and Energy Demand in a Single-Family House in Poland,” *Buildings*, vol. 11, nr 12, s. 595, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings11120595>.
- [86] M. J. Sorgato, A. P. Melo i R. Lamberts, „The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption,” *Energy and Buildings*, vol. 133, s. 1–13, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.059>.
- [87] K. Grygierek, J. Ferdyn-Grygierek, A. Gumińska, Ł. Baran, M. Barwa, K. Czerw, P. Gowik, K. Makselan, K. Potyka i A. Psikuta, „Energy and Environmental Analysis of Single-Family Houses Located in Poland,” *Energies*, vol. 13, nr 11, s. 2740, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/en13112740>.
- [88] A. Michael, D. Demosthenous i M. Philokyprou, „Natural ventilation for cooling in mediterranean climate: A case study in vernacular architecture of Cyprus,” *Energy and Buildings*, vol. 144, s. 333–345, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.040>.
- [89] M. Krzaczek, J. Florczuk i J. Tejchman, „Field investigations of stack ventilation in a residential building with multiple chimneys and tilted window in cold climate,” *Energy and Buildings*, vol. 103, s. 48–61, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.034>.
- [90] EU Standard EN15251:2007. Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics; European Committee for Standardization: Bruksela, Belgia, 2007.
- [91] F. Stazi, F. Naspi, G. Ulpiani i C. Di Perna, „Indoor air quality and thermal comfort optimization in classrooms developing an automatic system for windows opening and closing,” *Energy and Buildings*, vol. 139, s. 732–746, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.017>.
- [92] T. Psomas, M. Fiorentini, G. Kokogiannakis i P. Heiselberg, „Ventilative cooling through automated window opening control systems to address thermal discomfort risk during the summer period: Framework, simulation and parametric analysis,” *Energy and Buildings*, vol. 153, s. 18–30, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.088>.
- [93] W. Zhang, W. Wu, L. Norford, N. Li i A. Malkawi, „Model predictive control of short-term winter natural ventilation in a smart building using machine learning algorithms,” *Journal of Building Engineering*, vol. 73, s. 106602–106602, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106602>.
- [94] E.P.M. Bouwens, M.G.L.C. Loomans, J.L.M. Hensen i J.J.N. Lichtenberg, „Ventilative Cooling Potential in Low-Energy Dwellings –The HoTT Case Study,” w *CLIMA 2016: Proceedings of the 12th REHVA World Congress*, Aalborg, Denmark, 2016, s. 1-10.
- [95] H. M. Maghrabie, M. A. Abdelkareem, K. Elsaid, E. T. Sayed, A. Radwan, H. Rezk, T. Wilberforce, A. G. Abo-Khalil, A. G. Olabi, „A review of solar chimney for natural ventilation of residential and non-residential buildings,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, s. 102082, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102082>.
- [96] T. Yu, P. Heiselberg, B. Lei, M. Pomianowski i C. Zhang, „A novel system solution for cooling and ventilation in office buildings: A review of applied technologies and a case study,” *Energy and Buildings*, vol. 90, s. 142–155, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.057>.

- [97] A. N. Zoure i P. V. Genovese, „Implementing natural ventilation and daylighting strategies for thermal comfort and energy efficiency in office buildings in Burkina Faso,” *Energy Reports*, vol. 9, s. 3319–3342, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.02.017>.
- [98] N. W. Tuck, S. A. Zaki, A. Hagishima, H. B. Rijal, M. A. Zakaria i F. Yakub, „Effectiveness of free running passive cooling strategies for indoor thermal environments: Example from a two-storey corner terrace house in Malaysia,” *Building and Environment*, vol. 160, s. 106214, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106214>.
- [99] H. Kitagawa, T. Asawa, T. Kubota, A. R. Trihamdani, K. Sakurada i H. Mori, „Optimization of window design for ventilative cooling with radiant floor cooling systems in the hot and humid climate of Indonesia,” *Building and Environment*, s. 107483, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107483>.
- [100] L. Ledo Gomis, M. Fiorentini i D. Daly, „Potential and practical management of hybrid ventilation in buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 231, s. 110597, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110597>.
- [101] K. Grygierek i J. Ferdyn-Grygierek, „Multi-Objectives Optimization of Ventilation Controllers for Passive Cooling in Residential Buildings,” *Sensors*, vol. 18, nr 4, s. 1144, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/s18041144>.
- [102] M. J. Alonso, H. M. Mathisen i R. Collins, „Ventilative Cooling as a Solution for Highly Insulated Buildings in Cold Climate,” *Energy Procedia*, vol. 78, s. 3013–3018, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.707>.
- [103] A. Brambilla, J. Bonvin, F. Flourentzou i T. Jusselme, „On the Influence of Thermal Mass and Natural Ventilation on Overheating Risk in Offices,” *Buildings*, vol. 8, nr 4, s. 47, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings8040047>.
- [104] A. Tejero-González, M. Andrés-Chicote, P. García-Ibáñez, E. Velasco-Gómez i F. J. Rey-Martínez, „Assessing the applicability of passive cooling and heating techniques through climate factors: An overview,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, s. 727–742, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.077>.
- [105] N. Artmann, H. Manz i P. Heiselberg, „Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe,” *Applied Energy*, vol. 84, nr 2, s. 187–201, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.05.004>.
- [106] T. Kubota i D. T. Hooi Chyee, „Potential of Passive Cooling Techniques for Modern Houses in the Tropical Climate of Malaysia – Analysis of the Indoor Thermal Environment for Various Ventilation Strategies,” *International Journal of Ventilation*, vol. 9, nr 1, s. 11–23, 2010, doi: <https://doi.org/10.1080/14733315.2010.11683863>.
- [107] M. Herrera, S. Natarajan, D. Coley, T. Kershaw, AP Ramallo Gonzalez, M. Eames, D. Fosas i M. Wood, „A review of current and future weather data for building simulation,” *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 38, nr 5, s. 602–627, 2017, doi: <https://doi.org/10.1177/0143624417705937>.
- [108] A. Invidiata i E. Ghisi, „Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil,” *Energy and Buildings*, vol. 130, s. 20–32, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.067>.
- [109] K. Kalvelage, U. Passe, S. Rabideau i E. S. Takle, „Changing climate: The effects on energy demand and human comfort,” *Energy and Buildings*, vol. 76, s. 373–380, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.009>.
- [110] Y. Cui, D. Yan, T. Hong, C. Xiao, X. Luo i Q. Zhang, „Comparison of typical year and multiyear building simulations using a 55-year actual weather data set from China,” *Applied Energy*, vol. 195, s. 890–904, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.113>.
- [111] H. Yassaghi, N. Mostafavi i S. Hoque, „Evaluation of current and future hourly weather data intended for building designs: A Philadelphia case study,” *Energy and Buildings*, vol. 199, s. 491–511, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.016>.

- [112] A. Moazami, V. M. Nik, S. Carlucci i S. Geving, „Impacts of future weather data typology on building energy performance – Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions,” *Applied Energy*, vol. 238, s. 696–720, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.085>.
- [113] IPCC. IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES): Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III Intergovernmental Panel on Climate Change; Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva, Switzerland, 2000.
- [114] K. Verichev, M. Zamorano i M. Carpio, „Effects of climate change on variations in climatic zones and heating energy consumption of residential buildings in the southern Chile,” *Energy and Buildings*, vol. 215, s. 109874, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109874>.
- [115] R. Escandón, R. Suárez, J. J. Sendra, F. Ascione, N. Bianco i G. M. Mauro, „Predicting the Impact of Climate Change on Thermal Comfort in A Building Category: The Case of Linear-type Social Housing Stock in Southern Spain,” *Energies*, vol. 12, nr 12, s. 2238, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/en12122238>.
- [116] H. Kikumoto, R. Ooka, Y. Arima i T. Yamanaka, „Study on the future weather data considering the global and local climate change for building energy simulation,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 14, s. 404–413, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.08.007>.
- [117] A. Sabunas i A. Kanapickas, „Estimation of climate change impact on energy consumption in a residential building in Kaunas, Lithuania, using HEED Software,” *Energy Procedia*, vol. 128, s. 92–99, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.020>.
- [118] A. Dodoo, L. Gustavsson i F. Bonakdar, „Effects of Future Climate Change Scenarios on Overheating Risk and Primary Energy Use for Swedish Residential Buildings,” *Energy Procedia*, vol. 61, s. 1179–1182, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1048>.
- [119] U. Y. A. Tettey, A. Dodoo i L. Gustavsson, „Energy use implications of different design strategies for multi-storey residential buildings under future climates,” *Energy*, vol. 138, s. 846–860, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.123>.
- [120] M. Hamdy, S. Carlucci, P.-J. Hoes i J. L. M. Hensen, „The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study,” *Building and Environment*, vol. 122, s. 307–323, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.031>.
- [121] D. Bienvenido-Huertas, D. Sánchez-García i C. Rubio-Bellido, „Influence of the RCP scenarios on the effectiveness of adaptive strategies in buildings around the world,” *Building and Environment*, vol. 208, s. 108631, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108631>.
- [122] D. Bienvenido-Huertas, C. Rubio-Bellido, A. Pérez-Fargallo i J. A. Pulido-Arcas, „Energy saving potential in current and future world built environments based on the adaptive comfort approach,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 249, s. 119306, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119306>.
- [123] X. Shen, G. Zhang i B. Bjerg, „Comparison of different methods for estimating ventilation rates through wind driven ventilated buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 54, s. 297–306, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.017>.
- [124] T. E. Jiru i G. T. Bitsuamlak, „Application of CFD in Modelling Wind-Induced Natural Ventilation of Buildings - A Review,” *International Journal of Ventilation*, vol. 9, nr 2, s. 131–147, 2010, doi: <https://doi.org/10.1080/14733315.2010.11683875>.
- [125] C. Zhou, Z. Wang, Q. Chen, Y. Jiang i J. Pei, „Design optimization and field demonstration of natural ventilation for high-rise residential buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 82, s. 457–465, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.036>.
- [126] N. Rodrigues Marques Sakiyama, J. Frick, T. Bejat i H. Garrecht, „Using CFD to Evaluate Natural Ventilation through a 3D Parametric Modeling Approach,” *Energies*, vol. 14, nr 8, s. 2197, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14082197>.

- [127] B. Yan, A. Malkawi i Y. Chen, „A Method for Estimating Cooling Energy Savings Potential from using Mixed-Mode Ventilation,” w *Building Simulation Conference Proceedings*, Hyderabad, India, 2015, doi: <https://doi.org/10.26868/25222708.2015.2125>.
- [128] J. M. Gimenez, F. Bre, N. M. Nigro i V. Fachinotti, „Computational modeling of natural ventilation in low-rise non-rectangular floor-plan buildings,” *Building Simulation*, vol. 11, nr 6, s. 1255–1271, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0461-9>.
- [129] A. Figueroa-Lopez, A. Arias, X. Oregi i I. Rodríguez, „Evaluation of passive strategies, natural ventilation and shading systems, to reduce overheating risk in a passive house tower in the north of Spain during the warm season,” *Journal of Building Engineering*, vol. 43, s. 102607, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102607>.
- [130] L. Iskandar, Ezgi Bay-Sahin, A. Martinez-Molina i S. Beeson, „Evaluation of passive cooling through natural ventilation strategies in historic residential buildings using CFD simulations,” *Energy and buildings*, vol. 308, s. 114005, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114005>.
- [131] R. Stasi, F. Ruggiero i U. Berardi, „Influence of cross-ventilation cooling potential on thermal comfort in high-rise buildings in a hot and humid climate,” *Building and Environment*, vol. 248, s. 111096, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111096>.
- [132] „(PDF) Study of natural ventilation in a residential apartment on windows and openings based on CFD,” www.researchgate.net. https://www.researchgate.net/publication/331246755_Study_of_natural_ventilation_in_a_residential_apartment_on_windows_and_openings_based_on_CFD.
- [133] X. Deng i Z. Tan, „Numerical analysis of local thermal comfort in a plan office under natural ventilation,” *Indoor and Built Environment*, vol. 29, nr 7, s. 1-15, 2019, doi: <https://doi.org/10.1177/1420326x19866497>.
- [134] A. Meiss, M. Padilla-Marcos i J. Feijó-Muñoz, „Methodology Applied to the Evaluation of Natural Ventilation in Residential Building Retrofits: A Case Study,” *Energies*, vol. 10, nr 4, s. 456, 2017, doi: <https://doi.org/10.3390/en10040456>.
- [135] R. Widiastuti, M. I. Hasan, C. N. Bramiana i P. U. Pramesti, „CFD Simulation on the Natural Ventilation and Building Thermal Performance,” w *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 448, nr 1, s. 012004, 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/448/1/012004>.
- [136] N. Yoon, J. M. Han, i A. Malkawi, „Finding the optimum window locations of a single zone: To maximize the wind-driven natural ventilation potential” w *16th International Conference of the International Building Performance Simulation Association*, Rzym, Włochy, 2019.
- [137] H. Sacht i M. A. Lukiantchuki, „Windows Size and the Performance of Natural Ventilation,” *Procedia Engineering*, vol. 196, s. 972–979, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.038>.
- [138] K. Kosutova, T. van Hooff, C. Vanderwel, B. Blocken i J. Hensen, „Cross-ventilation in a generic isolated building equipped with louvers: Wind-tunnel experiments and CFD simulations,” *Building and Environment*, vol. 154, s. 263–280, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.019>.
- [139] M. Shirzadi, P. A. Mirzaei i M. Naghashzadegan, „Development of an adaptive discharge coefficient to improve the accuracy of cross-ventilation airflow calculation in building energy simulation tools,” *Building and Environment*, vol. 127, s. 277–290, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.019>.
- [140] J. Wang, T. Zhang, S. Wang i F. Battaglia, „Numerical investigation of single-sided natural ventilation driven by buoyancy and wind through variable window configurations,” *Energy and Buildings*, vol. 168, s. 147–164, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.015>.

- [141] K. Visagavel i P. S. S. Srinivasan, „Analysis of single side ventilated and cross ventilated rooms by varying the width of the window opening using CFD,” *Solar Energy*, vol. 83, nr 1, s. 2–5, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.06.004>.
- [142] A. Raczkowski, Z. Suchorab i P. Brzyski, „Computational fluid dynamics simulation of thermal comfort in naturally ventilated room,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 252, s. 04007, 2019, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925204007>.
- [143] G. Elshafei, A. Negm, M. Bady, M. Suzuki i M. G. Ibrahim, „Numerical and experimental investigations of the impacts of window parameters on indoor natural ventilation in a residential building,” *Energy and Buildings*, vol. 141, s. 321–332, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.055>.
- [144] X.-Y. Ma, Y. Peng, F.-Y. Zhao, C.-W. Liu i S.-J. Mei, „Full Numerical Investigations on the Wind Driven Natural Ventilation: Cross Ventilation and Single-sided Ventilation,” *Procedia Engineering*, vol. 205, s. 3797–3803, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.128>.
- [145] P.-C. Chou, C.-M. Chiang, Y.-Y. Li, C.-Y. Lee i K.-F. Chang, „Natural Ventilation Efficiency in a Bedroom with a Central-Pivoting Window,” *Indoor and Built Environment*, vol. 17, nr 2, s. 164–172, 2008, doi: <https://doi.org/10.1177/1420326x08089621>.
- [146] H. Wang, P. Karava i Q. Chen, „Development of simple semiempirical models for calculating airflow through hopper, awning, and casement windows for single-sided natural ventilation,” *Energy and Buildings*, vol. 96, s. 373–384, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.041>.
- [147] S.-C. Chung, Y.-P. Lin, C. Yang i C.-M. Lai, „Natural Ventilation Effectiveness of Awning Windows in Restrooms in K-12 Public Schools,” *Energies*, vol. 12, nr 12, s. 2414, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/en12122414>.
- [148] A. Lewandowska, A. Noskowiak, G. Paichrowski, W. Strykowski i A. Witczak, *Środowiskowa ocena cyklu życia modelowych budynków drewnianych i murowanych jako przykład zastosowania techniki LCA*. Poznań, Instytut Technologii Drewna, 2012.
- [149] J. Thøgersen i K. S. Nielsen, „A better carbon footprint label,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 125, s. 86–94, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.098>.
- [150] „Air Pollution Calculations,” *Elsevier eBooks*, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/c2017-0-02742-8>.
- [151] A. Lesiuk, P. Oleszczuk i M. Kuśmierz, „Zastosowanie techniki LCA w ekologicznej ocenie produktów, technologii i gospodarce odpadami, w *Adsorbenty i katalizatory. Wybrane technologie a środowisko*, J. Ryczkowski, Red., Rzeszów: uniwersytet Rzeszowski, 2012, s.453-466.
- [152] R. Moschetti i H. Brattebø, „Combining Life Cycle Environmental and Economic Assessments in Building Energy Renovation Projects,” *Energies*, vol. 10, nr 11, s. 1851, 2017, doi: <https://doi.org/10.3390/en10111851>.
- [153] M.G. Almeida, M.A. Ferreira i A. Rodrigues, „Cost effective energy and CO₂ emissions optimization in building renovation – Annex 56 methodology and its application to a case study w *Conference “CLIMA 2016 – 12th REHVA World Congress”*, Aalborg, Dania, 2016”.
- [154] „Methodology for Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation (Annex 56) Energy in Buildings and Communities Programme,” 2017. [Online]. Dostępny: https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_56_Methodology_Cost-Effective_Energy_Carbon_Emissions_Optimization_Building_Renovation.pdf [Dostęp: 26.11.2020].
- [155] H. B. Kim, T. Yoshioka, J. Kim i S. Kim, „Estimation of wood biomass boiler use in cold climate regions on CO₂ emissions of light-frame timber structure,” *Results in Engineering*, vol. 23, s. 102698–102698, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102698>

- [156] K. Grygierek i J. Ferdyn-Grygierek, „Analysis of the Environmental Impact in the Life Cycle of a Single-Family House in Poland,” *Atmosphere*, vol. 13, nr 2, s. 245, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/atmos13020245>.
- [157] W. Guo, S. Liang, Y. He, W. Li, B. Xiong i H. Wen, „Combining EnergyPlus and CFD to predict and optimize the passive ventilation mode of medium-sized gymnasium in subtropical regions,” *Building and Environment*, vol. 207, s. 108420, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108420>.
- [158] K. Grygierek, J. Ferdyn-Grygierek i I. Sarna, „Wpływ pasywnego chłodzenia budynków na komfort cieplny i zużycie energii –analizy numeryczne”, w *Wyzwania stojące przed miastami przyszłości. Inteligentne miasta i mobilność przyszłości*, G. Sierpiński, Red., Gliwice: Politechnika Śląska, 2021, s. 77-80.
- [159] I. Sarna, J. Ferdyn-Grygierek i K. Grygierek, „Zalety i ograniczenia naturalnego chłodzenia domów jednorodzinnych” w *Nowoczesne technologie - strategie, rozwiązania i perspektywy rozwoju*, I. Mołdoch-Mendoń, K. Skrzątek, Red., Lublin: Wydawnictwo Naukowe TYGIEL Sp. z o. o., 2021, s.135-146.
- [160] Apar [Online]. Dostępny: www.apar.pl [Dostęp: 19.06.2023].
- [161] ISO 12569:2017 Thermal Performance of Buildings and Materials—Determination of Specific Airflow Rate in Buildings—Tracer Gas Dilution Method; International Organization for Standardization: Geneva, Szwajcaria, 2017.
- [162] [Online] Dostępny: http://www.sensotron.pl/e_ps33.htm, [Dostęp: 19.06.2023].
- [163] P.O. Fanger. *Komfort cieplny*, Warszawa, Arkady, 1974.
- [164] [Online] <http://www.sensor-electronic.pl/>. [Dostęp: 19.06.2023].
- [165] PN-EN ISO 7726:2002 Ergonomia środowiska termicznego- Przyrządy do pomiaru wielkości fizycznych.
- [166] EN ISO 7730: 2005 Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort.
- [167] R. M. S. F. Almeida, E. Barreira i P. Moreira, „Assessing the variability of the air change rate through tracer gas measurements,” *Energy Procedia*, vol. 132, s. 831–836, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.013>.
- [168] I. Sarna, J. Ferdyn-Grygierek i W. Pohl, „Wybrane aspekty diagnostyki cieplnej – przykładowa ocena domu jednorodzinnego” w *Współczesne problemy ochrony środowiska i energetyki 2021*, M. Bogacka, K. Pikoń, Red., Gliwice: Politechnika Śląska, 2022, s. 181-191.
- [169] W. S. Dols i B. J. Polidoro, „CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.4,” 2020, doi: <https://doi.org/10.6028/nist.tn.1887r1>.
- [170] EnergyPlus Essentials, EnergyPlus™ Version 9.4.0 Documentation; US Department of Energy: Washington, DC, USA, 2020 [Online]. Dostępny: <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/9-4/essentials/index.html>. [Dostęp: 23.02.2021].
- [171] D. B. Crawley i in., „Energyplus: New, Capable i Linked,” *Journal of Architectural and Planning Research*, vol. 21, nr 4, s. 292–302, 2004, [Online]. Dostępny: <https://www.jstor.org/stable/43030706>. [Dostęp: 03.04.2022].
- [172] [Online]. Dostępny: <https://pl.python.org/>. [Dostęp: 03.04.2022].
- [173] MathWorks, „MATLAB - MathWorks,” *Mathworks.com*, 2019. [Online]. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. [Dostęp: 02.08.2022].
- [174] Dokumentacja programu SketchUp, [Online]. Dostępny: <https://sketchup.com/pl/>. [Dostęp: 11.03.2020].
- [175] Dokumentacja programu OpenStudio, [Online]. Dostępny: <http://nrel.github.io/OpenStudio-user-documentation/>. [Dostęp: 28.02.2020].

- [176] J.H. Klotz, J.A. Milke, P.G. Turnbull, A. Kashef i M.J. Ferreira. Handbook of SmokeControl Engineering. Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2012.
- [177] M. Mijakowski and J. Sowa, „Modelowanie wilgotności względnej powietrza w budynkach - możliwości i ograniczenia programu CONTAMW 3.0,” *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, vol. 6, nr 1, 2024.
- [178] T. Nouidui, M. Wetter i W. Zuo, „Functional mock-up unit for co-simulation import in EnergyPlus,” *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 7, nr 3, s. 192–202, 2013, doi: <https://doi.org/10.1080/19401493.2013.808265>.
- [179] G.N. Walton, AIRNET – A Computer Program for Building Airflow Network Modeling,, NISTIR 89-4072, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1989.
- [180] W. S. Dols, S. J. Emmerich i B. J. Polidoro, „Coupling the multizone airflow and contaminant transport software CONTAM with EnergyPlus using co-simulation,” *Building Simulation*, vol. 9, nr 4, s. 469–479, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0279-2>.
- [181] T. Blochwitz i in. „The Functional Mockup Inter-face for Tool independent Exchange of Simulation Models” w *Proceedings of the 8th International: Modelica Conference*, Drezno, Niemcy, 2011.
- [182] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook Fundamental, Atlanta, GA, USA American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1997.
- [183] <http://buroshade.com/wp-content/uploads/2022/03/BuroshadeCatalogue2022.pdf>. [Dostęp: 04.04.2022].
- [184] C. Zhang i F. Wang, „Comfort Management of Fibrous Materials,” *Handbook of Fibrous Materials*, w Handbook of Fibrous Materials, J. Hu, J. Lu, Red., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., 2020 s. 857–887, doi: <https://doi.org/10.1002/9783527342587.ch31>.
- [185] M. Bojić, N. Nikolić, D. Nikolić, J. Skerlić i I. Miletić, „A simulation appraisal of performance of different HVAC systems in an office building,” *Energy and Buildings*, vol. 43, nr 6, s. 1207–1215, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.033>.
- [186] M. Pinto., J. Viegas J. i V. Freitas, „Summer cross ventilation in residential buildings” w *Proceedings of the Energy for Sustainability International Conference 2017 Designing Cities & Communities for the Future*, Funchal, Portugalia, 2017.
- [187] G.Y. Achakji i G.T. Tamura, *Pressure drop characteristics of typical stairshafts in high rise buildings*. ASHRAE Trans. 1988.
- [188] H.B. Awbi. *Ventilation of Buildings*, London, UK, Spon Press Taylor & Francis Group, New York, NY, USA, 2004.
- [189] M. Blaszcok i A. Baranowski, „Thermal improvement in residential buildings in view of the indoor air quality - case study for Polish dwelling,” *Architecture Civil Engineering Environment ACEE*, , vol. 11, s 121-130. 2018, doi: <https://doi.org/10.21307/acee-2018-044>.
- [190] J. Ferdyn-Grygierek, A. Baranowski, M. Blaszcok i J. Kaczmarczyk, „Thermal Diagnostics of Natural Ventilation in Buildings: An Integrated Approach,” *Energies*, vol. 12, nr 23, s. 4556, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/en12234556>.
- [191] „<https://warmandcold.pl/products/klimatyzator-split-gree-fairy-7-1-kw-gwh24ace-k6dna1i>,” [Dostęp: 05.10.24].
- [192] Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) nr 626/2011 z dnia 4 maja 2011 r. uzupełniające dyrektywę 2010/30/UE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do etykiet efektywności energetycznej dla klimatyzatorów.

- [193] ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta, GA, USA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.
- [194] J. F. Nicol i M. A. Humphreys, „Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 34, nr 6, s. 563–572, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(02)00006-3).
- [195] S. I. ul H. Gilani, M. H. Khan i W. Pao, „Thermal Comfort Analysis of PMV Model Prediction in Air Conditioned and Naturally Ventilated Buildings,” *Energy Procedia*, vol. 75, s. 1373–1379, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.218>.
- [196] N. A. Shaari, S. A. Zaki, M. S. Mat Ali i A. Abd Razak, „Investigation of the PMV and TSV Models of Thermal Comfort in Air-Conditioned University Classrooms in Malaysia,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 819, s. 207–211, 2016, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.819.207>.
- [197] N. Djongyang, R. Tchinda i D. Njomo, „Thermal comfort: A review paper,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, nr 9, s. 2626–2640, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.040>.
- [198] Y. Song, F. Mao i Q. Liu, „Human Comfort in Indoor Environment: A Review on Assessment Criteria, Data Collection and Data Analysis Methods,” *IEEE Access*, vol. 7, s. 119774–119786, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2937320>.
- [199] E. Barbadilla-Martín, J. Guadix Martín, J. M. Salmerón Lissén, J. Sánchez Ramos i S. Álvarez Domínguez, „Assessment of thermal comfort and energy savings in a field study on adaptive comfort with application for mixed mode offices,” *Energy and Buildings*, vol. 167, s. 281–289, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.033>.
- [200] Weather Data; Institute of Meteorology and Water Management—State Research Institute [Online]. Dostępny: <https://meteo.imgw.pl/>. [Dostęp 15.07.2022].
- [201] Atmosphere Data Store [Online]. Dostępny: <https://ads.atmosphere.copernicus.eu>. [Dostęp: 15.07.2022].
- [202] User Guide to the CAMS Radiation Service (CRS); [Online]. Dostępny: https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2022-01/CAMS2_73_2021SC1_D3.2.1_2021_UserGuide_v1.pdf. [Dostęp: 15.07.2022].
- [203] Typowe Lata Meteorologiczne i Statystyczne Dane Klimatyczne, [Online]. <https://dane.gov.pl/dataset/797,typowe-lata-meteorologiczne-i-statystyczne-dane-klimatyczne-dla-obszaru-polski-do-obliczen-energetycznych-budynkow> [Dostęp: 20.07.2021].
- [204] P. Narowski, Nowe typowe lata meteorologiczne dla Polski, [Online]. <https://www.rynekinstalacyjny.pl/artykul/cieplownictwo/152164,nowe-typowe-lata-meteorologiczne-dla-polski> [Dostęp: 11.01.22].
- [205] Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju, [Online]. Dostępny: <https://www.gov.pl/web/archiwum-inwestycje-rozwoj/dane-do-obliczen-energetycznych-budynkow>. [Dostęp 15.02.2021].
- [206] P. Narowski, Wystąpienie konferencyjne, „Typowe lata meteorologiczne 2001-2020. Porównanie z TLM 1971-2000 i skutki zmian” w *Seminarium POBE: REPowerEU - odpowiedź jak przygotować się na kryzys energetyczny budynków*, Konferencja Online, 20.09.2022.
- [207] ASHRAE. Guideline 14-2014. Measurement of Energy and Demand Savings, Atlanta, GA, USA, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2014.
- [208] M. Royapoor and T. Roskilly, „Building model calibration using energy and environmental data,” *Energy and Buildings*, vol. 94, s. 109–120, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.050>.
- [209] V. Gutiérrez González, G. Ramos Ruiz i C. Fernández Bandera, „Empirical and Comparative Validation for a Building Energy Model Calibration Methodology,” *Sensors*, vol. 20, nr 17, s. 5003, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20175003>.

- [210] A. Ogando, N. Cid i M. Fernández, „Energy Modelling and Automated Calibrations of Ancient Building Simulations: A Case Study of a School in the Northwest of Spain,” *Energies*, vol. 10, nr 6, s. 807–807, 2017, doi: <https://doi.org/10.3390/en10060807>.
- [211] J. Robertson, B. Polly, J. Collis, „Evaluation of Automated Model Calibration Techniques for Residential Building Energy Simulation”, Technical Report, , Golden, CO, USA, National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [212] T.A. Reddy, I. Maor, S. Jian, C. Panjapornporn, „Procedures for Reconciling Computer-Calculated Results with Measured Energy Data”, Technical Report; Atlanta, GA, USA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2006.
- [213] H. Manz, P. Loutzenhiser, T. Frank, P. A. Strachan, R. Bindi i G. Maxwell, „Series of experiments for empirical validation of solar gain modelling in building energy simulation codes - experimental setup, test cell characterization, specifications and uncertainty analysis - Strathprints,” *Strath.ac.uk*, 2006.
- [214] S. L. Jackson, „Research Methods: A Modular Approach”, Belmont USA, Thomson Wadsworth, 2008.
- [215] J. D. Evans, *Straightforward statistics for the behavioral sciences*, Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Publishing, 1996.
- [216] I. Sarna, J. Ferdyn-Grygierek i K. Grygierek, „Thermal Model Validation Process for Building Environment Simulation: A Case Study for Single-Family House,” *Atmosphere*, vol. 13, nr 8, s. 1295, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/atmos13081295>.
- [217] ANSYS „Engineering Simulation & 3D Design Software | Ansys” [Online]. Dostępny: <https://www.ansys.com>. [Dostęp: 30.09.2024].
- [218] R. W. Lyczkowski, „The Rise of the First Commercial CFD Codes: PHOENICS, FLUENT, FIDAP, CFX, FLOW-3D, and STAR-CD,” *Mechanical engineering series*, s. 185–187, 2017, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66502-3_14.
- [219] S. F. Díaz-Calderón, J. A. Castillo i G. Huelsz, „Evaluation of different window heights and facade porosities in naturally cross-ventilated buildings: CFD validation,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 232, s. 105263, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105263>.
- [220] Y. He, Y. Chu, H. Zang, J. Zhao i Y. Song, „Experimental and CFD study of ventilation performance enhanced by roof window and mechanical ventilation system with different design strategies,” *Building and Environment*, vol. 224, s. 109566, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109566>.
- [221] M. Hajdukiewicz, M. Geron, i M. M. Keane, „Calibrated CFD simulation to evaluate thermal comfort in a highly-glazed naturally ventilated room,” *Building and Environment*, vol. 70, s. 73–89, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.020>.
- [222] J. Wang, S. Wang, T. Zhang i F. Battaglia, „Assessment of single-sided natural ventilation driven by buoyancy forces through variable window configurations,” *Energy and Buildings*, vol. 139, s. 762–779, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.070>.
- [223] A. Bulińska, Z. Popiołek i Z. Buliński, „Experimentally validated CFD analysis on sampling region determination of average indoor carbon dioxide concentration in occupied space,” *Building and Environment*, vol. 72, s. 319–331, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.001>.
- [224] Uponor [Online]. Dostępny: https://budujemydom.pl/files/bsl/13844-bd9_2017_212_213.pdf [Dostęp: 20.05.2024].
- [225] D. Paczesny, P. Rapiejko, J. Weremczuk, R. Jachowicz i D. Jurkiewicz, „Pomiary temperatury powietrza w jamach nosa i jamie ustnej,” *Otolaryngologia Polska*, vol. 61, nr 5, s. 864–867, 2007, doi: [https://doi.org/10.1016/S0030-6657\(07\)70543-7](https://doi.org/10.1016/S0030-6657(07)70543-7).
- [226] EN 13129:2016: Railway applications – Air conditioning for main line rolling stock – Comfort parameters and type tests.

- [227] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami [Online]. Dostępny: https://krajowabaza.kobize.pl/docs/Wska%C5%BAniki_ma%C5%82e_%C5%BAr%C3%B3dla_spalania_paliw_2022_i_2023-SZABLON.pdf. [Dostęp: 30.08.2024].
- [228] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami [Online]. Dostępny: https://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/wskazniki_emisyjnosci/Wska%C5%BAniki_emisyjno%C5%9Bci_dla_energii_elektrycznej_grudzie%C5%84_2022.pdf. [Dostęp: 30.08.2024].
- [229] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami [Online]. Dostępny: https://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/wskazniki_emisyjnosci/WO_i_WE_do_monitorowania-ETS-2024.pdf. [Dostęp: 30.08.2024].
- [230] [Online]. Dostępny: <https://zielona-energia.cire.pl/artykuly/zielona-gospodarka/145226-mozliwosci-intensyfikacji-wykorzystania-biomasy-w-cieplownictwie>. [Dostęp: 20.10.2024].
- [231] [Online]. Dostępny: <https://www.gov.pl/web/klimat/nowy-system-rozliczania-tzw-net-billing>. [Dostęp: 20.10.2024].
- [232] [Online]. Dostępny: <https://www.ure.gov.pl/pl/urząd/informacje-ogolne/komunikaty-prezesa-ure/11856,Informacja-nr-202024.html>. [Dostęp: 20.10.2024].
- [233] [Online]. Dostępny: <https://enerad.pl/fotowoltaika/cena-odkupu-sprzedazy-energii-z-fotowoltaiki-net-billing-rcem/>. [Dostęp: 20.10.2024].
- [234] [Online]. Dostępny: <https://www.pse.pl/oire/rcem-rynkowa-miesieczna-cena-energii-elektrycznej>. [Dostęp: 20.10.2024].
- [235] [Online]. Dostępny: <https://domshop.pl/silownik-elektryczny-fakro-zws-230/>. [Dostęp: 20.10.2024].
- [236] [Online]. Dostępny: <https://www.veluxshop.pl/produkty/smart-home/velux-active-dla-zdrowszego-klimatu-w-twoim-domu>. [Dostęp: 20.10.2024].
- [237] [Online]. Dostępny: <https://www.fakro.pl/okna-dachowe/typy/obrotowe-z-wave/>. [Dostęp: 20.10.2024].
- [238] [Online]. Dostępny: <https://www.velux.pl/produkty/okna-dachowe/elektrycznie-sterowane-okna-dachowe>. [Dostęp: 20.10.2024].
- [239] World Health Organization. Regional Office for Europe & Ranson, P. Ray, „Guidelines for Healthy Housing”, Kopenhaga: WHO Regional Office for Europe, 1988.”
- [240] [Online]. Dostępny: <https://www.thensf.org/sleep-tips/>. [Dostęp: 20.10.2024].
- [241] Y. Chen, Z. Tong i A. Malkawi, „Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations,” *Building and Environment*, vol. 122, s. 386–396, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.026>.
- [242] J. Monahan i J. C. Powell, „An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework,” *Energy and Buildings*, vol. 43, nr 1, s. 179–188, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.005>.
- [243] G. A. Blengini i T. Di Carlo, „The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 42, nr 6, s. 869–880, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.009>.

Spis tabel

Tab. 5.1. Zestawienie przegród budowlanych	50
Tab. 5.2. Dane techniczne sond pomiarowych [164].....	55
Tab. 5.3. Procentowy udział godzin z temperaturą w podanych zakresach dla okresu letniego	59
Tab. 5.4. Parametry mikroklimatu – pokój 1	61
Tab. 5.5. Parametry mikroklimatu – pokój 2	62
Tab. 5.6. Zestawienie wskaźników PMV, PPD, DR i pionowego gradientu temperatury - pokój 1	63
Tab. 5.7. Zestawienie wskaźników PMV, PPD, DR i pionowego gradientu temperatury - pokój 2.....	63
Tab. 5.8. Liczba wymian powietrza N obliczona dla poszczególnych lokalizacji mierników i strumień powietrza wentylacyjnego V w pomieszczeniach.....	65
Tab. 6.1. Zestawienie grzejników	71
Tab. 6.2. Moc chłodnicza jednostek klimatyzacyjnych	74
Tab. 6.3. Wartości wskaźników $NMBE$, $CV(RMSE)$, D , R dla skalibrowanego modelu.....	81
Tab. 7.1. Zestawienie wariantów symulacyjnych w ramach walidacji modelu.....	87
Tab. 7.2. Zestawienie temperatury powietrza otaczającego domenę obliczeniową w miejscu występowania poszczególnych przegród przezroczystych i nieprzezroczystych modelu numerycznego pomieszczenia	89
Tab. 7.3. Zestawienie danych opisujących warunki brzegowy szczeliny okna balkonowego	90
Tab. 7.4. Zestawienie wskaźników statystycznych.....	92
Tab. 7.5. Zestawienie wyników symulacji parametrów powietrza przy zamkniętym oknie	93
Tab. 8.1. Wewnętrzne zyski ciepła	100
Tab. 8.2. Zestawienie okien wraz z powierzchnią otwarcia	103
Tab. 8.3. Zestawienie analizowanych wyników dla poszczególnych przypadków	105
Tab. 8.4. Udział procentowy liczby godzin dyskomfortu cieplnego w danym pomieszczeniu w okresie chłodzenia w zależności od zastosowania dodatkowego zasłonięcia okien	107
Tab. 8.5. Udział procentowy liczby godzin dyskomfortu cieplnego w danym pomieszczeniu w okresie chłodzenia przy otwartych i zamkniętych drzwiach	109
Tab. 8.6. Udział procentowy liczby godzin z liczbą wymian powietrza poniżej minimalnej wartości dla II kategorii środowiska wewnętrznego	110
Tab. 8.7 Udział procentowy liczby godzin z liczbą wymian powietrza powyżej 10 h^{-1} w danym pomieszczeniu w okresie chłodzenia przy otwartych i zamkniętych drzwiach	111
Tab. 8.8. Zestawienie zużycia ciepła i chłodu dla wariantów studium przypadku	123

Tab. 8.9. Zestawienie wariantów symulacyjnych CFD w ramach studium przypadku.....	125
Tab. 8.10. Zestawienie wariantów symulacyjnych CFD w ramach studium przypadku (ciąg dalszy).....	125
Tab. 8.11. Zestawienie maksymalnej względnej odległości przyściennej Y^+ dla wariantów C1–C8.....	126
Tab. 8.12. Zestawienie warunków brzegowych przegród przylegających do domeny obliczeniowej wraz z zadaną temperaturą powietrza po zewnętrznej stronie.....	126
Tab. 8.13. Zestawienie warunków brzegowych: strumienia powietrza infiltrującego, natężenia promieniowania słonecznego bezpośredniego i rozproszonego oraz wskaźnika zachmurzenia.....	126
Tab. 8.14. Zestawienie różnicy wartości średniej temperatury powietrza wewnętrznego w pomieszczeniu uzyskanej w ramach symulacji CFD względem wartości otrzymanej w symulacji energetycznej dla wariantów C1–C8.....	129
Tab. 8.15. Zestawienie wyników symulacji CDF w strefie przebywania ludzi	130
Tab. 9.1. Zestawienie emisji ditlenku węgla wraz ze wskaźnikiem emisji CO_2 dla wariantów studium przypadku.....	143

Spis rysunków

Rys. 2.1. Rzuty brył budynków: a) zamknięta, b) otwarta, jednolita, c) wklęsła, d) wypukła, e) strukturalna [17]	20
Rys. 2.2. Struktura źródeł ciepła w Polsce stosowanych w budownictwie mieszkalnym i niemieszkalnym – dane CEEB (stan na 30.09.2024) [39].....	23
Rys. 2.3. Schematy wentylacji naturalnej [44, 45]	25
Rys. 3.1. Klasyfikacja metod chłodzenia pasywnego wg Geethe i Velraj [55]	30
Rys. 5.1. Widok strony północnej domu jednorodzinnego objętego badaniami.....	49
Rys. 5.2. Rzut parteru budynku jednorodzinnego.....	51
Rys. 5.3. Rzut piętra budynku jednorodzinnego	51
Rys. 5.4. Lokalizacja sprzętu pomiarowego a) do pomiaru temperatury i wilgotności; b) do pomiaru zaniku stężenia; prezentowany jest moment dozowania gazu znacznikowego	53
Rys. 5.5. Rozmieszczenie wentylatorów, rejestratorów oraz dozowników suchego lodu w badanych pomieszczeniach.....	54
Rys. 5.6. Moduł pomiarowy SensoData 5500 [164].....	55
Rys. 5.7. Badane konfiguracje otwarcia okna: a) okno zamknięte, b) mikrouchylone, c) uchylone (otwarte).....	56
Rys. 5.8. Stanowisko do pomiarów pionowego rozkładu prędkości powietrza wewnętrznego w pomieszczeniu	56
Rys. 5.9. Przebieg zmienności temperatury w okresie pomiarowym w salonie i sypialni z zaznaczonymi granicznymi wartościami temperatury komfortu 20–26°C oraz optymalnej dla okresu letniego 24–26°C.....	57
Rys. 5.10. Średnia temperatura oraz maksymalna i minimalna odchyłka występująca w pomieszczeniach w rozpatrywanych okresach	58
Rys. 5.11. Średnia wilgotność względna oraz maksymalna i minimalna odchyłka występująca w pomieszczeniach w rozpatrywanych okresach	59
Rys. 6.1. Schemat połączenia programów EnergyPlus i CONTAM	68
Rys. 6.2. Model budynku w programie SketchUp.....	69
Rys. 6.3. Schemat pętli instalacji centralnego ogrzewania zamodelowanej w programie EnergyPlus (z zaznaczonymi węzłami pętli).....	72
Rys. 6.4. Widoki kondygnacji budynku przygotowanych w ContamW: (a) parteru, (b) poddasza. System wentylacji zaznaczono niebieskim kolorem	73
Rys. 6.5. Klasyfikacja środowiska cieplnego w budynkach z wentylacją naturalną (z znaczoną optymalną temperaturą komfortu cieplnego wg modelu adaptacyjnego) [193]	76
Rys. 6.6. Przebieg temperatury powietrza zewnętrznego (z danych meteo IMGW – stacja Katowice)	77

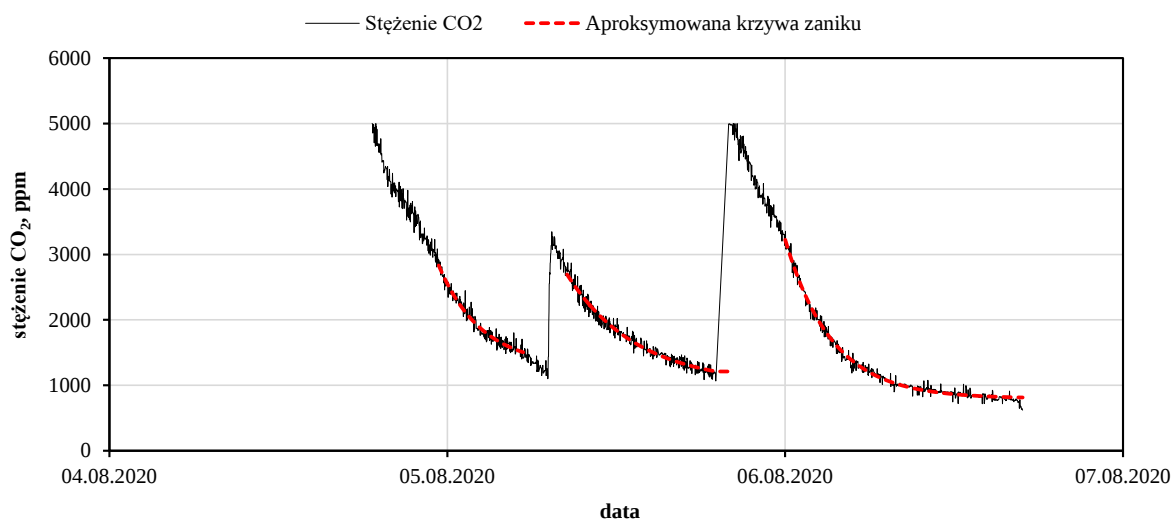
Rys. 6.7. Średnia, minimalna i maksymalna miesięczna temperatura powietrza zewnętrznego – porównanie TLM1970 i TLM2000.....	78
Rys. 6.8. Prognozowany przebieg zmienności temperatury powietrza zewnętrznego na 2050 rok	78
Rys. 6.9. Róża wiatrów w okresie chłodzenia pasywnego dla klimatów TLM2000 i 2050.....	79
Rys. 6.10. Przebieg zmienności temperatury powietrza w: a) salonie, b) gabinecie, c) sypialni, d) pokoju 1, e) pokoju 2, f) łazience dla godzinowych wartości zmierzonych i obliczonych.....	82
Rys. 6.11. Schemat kalibracji modelu	83
Rys. 7.1. Rzut piętra budynku jednorodzinnego z zaznaczonym pomieszczeniem testowym (po lewej) oraz zdjęcie pomieszczenia (po prawej)	85
Rys. 7.2. Geometria modelu numerycznego pomieszczenia z wyposażeniem oraz wyodrębniona szczelina wokół okna: w kolorze różowym dla okna uchylonego (otwartego) i mikrouchylonego (skrzydło lewe); w kolorze niebieskim (skrzydła prawego) i zielonym dla dolnej szczeliny	86
Rys. 7.3. Widok izometryczny pomieszczenia z siatką powierzchniową (po lewej) oraz przekrój przez siatkę objętościową w płaszczyźnie ZX modelu numerycznego badanego pomieszczenia.....	86
Rys. 7.4. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych dla profilu prędkości przy zamkniętym oknie z zaznaczonymi słupkami błędów w odległości od okna (wariant M1b): a) 0,25 i 0,35 m, b) 0,45 m i 0,55 m, c) 0,65 m i 0,75 m, d) 0,85 m i 0,95 m.....	96
Rys. 7.5. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych dla profilu prędkości przy oknie w pozycji mikrouchyłu z zaznaczonymi słupkami błędów w odległości od okna (wariant M2a): a) 0,25 i 0,45 m, b) 0,65 m i 0,85 m, c) 1,05 m i 1,25 m, d) 1,45 m i 1,65 m.....	97
Rys. 7.6. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych dla profilu prędkości przy oknie w pozycji uchylonej z zaznaczonymi słupkami błędów w odległości od okna (wariant M4a): a) 0,25 i 0,45 m, b) 0,65 m i 0,85 m, c) 1,05 m i 1,25 m, d) 1,45 m i 1,65 m.....	98
Rys. 8.1. Schemat wariantów chłodzenia budynku w ramach studium przypadku.....	100
Rys. 8.2. Rzut kondygnacji budynku z zaznaczonymi częściami otwieralnymi okien (kolor czerwony tradycyjne i balkonowe, kolor zielony dachowe)	103
Rys. 8.3. Udział procentowy liczby wymian powietrza w danym przedziale w pokoju 2: (a) W4, (b) W6	112
Rys. 8.4. Przebieg zmienności temperatury operatywnej, powietrza wewnętrznego i liczby wymian powietrza w pokoju nr 2 w dniu 22 lipca wraz z zaznaczoną pozycją otwarcia okna: zamkniętą „z” (kolor czerwony), mikrouchyłu „m” (kolor zielony), otwartą „o” (kolor niebieski).....	114

Rys. 8.5. Przebieg zmienności temperatury operatywnej i liczby wymian powietrza w pokoju 2 w dniu 26 sierpnia wraz z zaznaczoną pozycją otwarcia okna: zamkniętą „z” (kolor czerwony), mikrouchyłu „m” (kolor zielony), otwartą „o” (kolor niebieski)...	115
Rys. 8.6. Przebieg zmienności temperatury operatywnej, powietrza wewnętrznego i liczby wymian powietrza w pokoju nr 2 w dniu 18 czerwca wraz z zaznaczoną pozycją otwarcia okna: zamkniętą „z” (kolor czerwony), mikrouchyłu „m” (kolor zielony), otwartą „o” (kolor niebieski)	117
Rys. 8.7. Przebieg zmienności temperatury operatywnej, powietrza wewnętrznego i liczby wymian powietrza w pokoju nr 2 w dniu 8 sierpnia wraz z zaznaczoną pozycją otwarcia okna: zamkniętą „z” (kolor czerwony), mikrouchyłu „m” (kolor zielony), otwartą „o” (kolor niebieski)	118
Rys. 8.8. Roczne zapotrzebowanie na ciepło i chłód.....	119
Rys. 8.9. Roczne zużycie ciepła i chłodu (energia końcowa)	121
Rys. 8.10. Przebieg zmienności temperatury operatywnej oraz zużycia ciepła i liczby wymian powietrza w pokoju nr 2 w dniu 17 maja wraz z zaznaczoną pozycją otwarcia okna: zamkniętą „z” (kolor czerwony), mikrouchyłu „m” (kolor zielony), otwartą „o” (kolor niebieski).....	122
Rys. 8.11. a) Model numeryczny badanego pomieszczenia z wprowadzonymi zmianami, b) model człowieka.....	124
Rys. 8.12. Widok izometryczny pomieszczenia z siatką powierzchniową oraz przekrój przez siatkę objętościową w płaszczyźnie ZX, (b) modelu numerycznego badanego pomieszczenia z człowiekiem	124
Rys. 8.13. a) Model pomieszczenia z zaznaczoną strefą przebywania ludzi; b) Model człowieka wraz z zaznaczonymi punktami monitorowania	129
Rys. 8.14. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, Z = -2,9 m dla wariantu C1 i C2.....	132
Rys. 8.15. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, Z = -2,9 m dla wariantu C3 i C4.....	132
Rys. 8.16. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, Z = -2,9 m dla wariantu W5 i W6	133
Rys. 8.17. Rozkład temperatury powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, Z = -2,9 m dla wariantu C1 i C2.....	133
Rys. 8.18. Rozkład temperatury powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, Z = -2,9 m dla wariantu C3 i C4.....	133
Rys. 8.19. Rozkład temperatury powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, Z = -2,9 m dla wariantu C5 i C6.....	134
Rys. 8.20. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie YZ, X = 3 m dla wariantu C1 i C3 (strefa przebywania ludzi zaznaczona linią czarną przerywaną)	135
Rys. 8.21. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, Z = -2,9 m dla wariantu C1 i C3.....	135

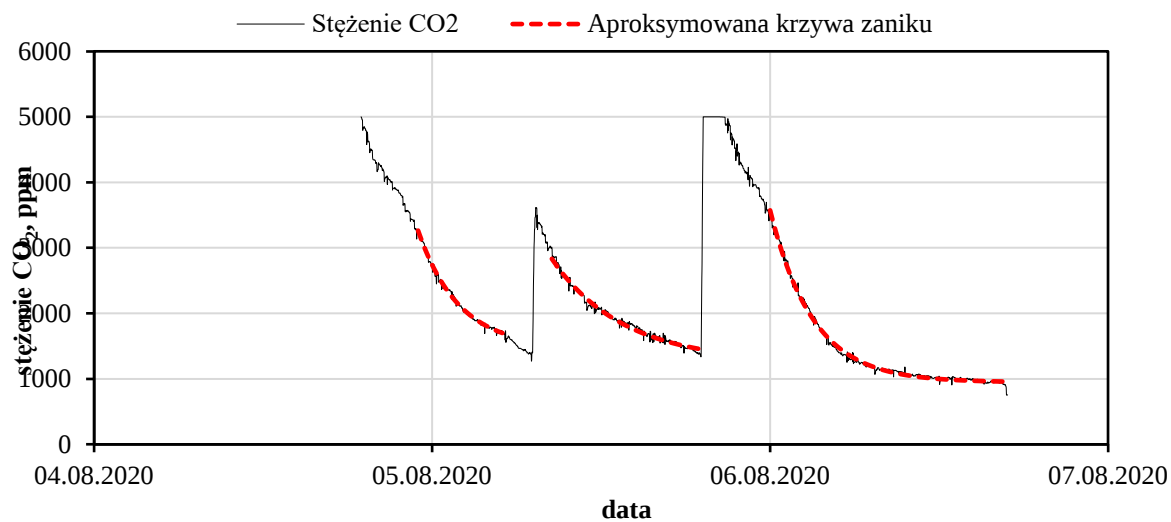
Rys. 8.22. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie YZ, $X = 3$ m dla wariantu C2 i C4	136
Rys. 8.23. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, $Z = -2,9$ m dla wariantu C2 i C4	136
Rys. 8.24. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XZ, $Y = 0,1$ m dla wariantu C2 i C4	137
Rys. 8.25. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XZ, $Y = 1,7$ m dla wariantu C2 i C4	137
Rys. 8.26. Rozkład prędkości powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, $Z = -2,9$ m dla wariantu C5 i C7	138
Rys. 8.27. Rozkład temperatury powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, $Z = -2,9$ m dla wariantu C5 i C7	139
Rys. 8.28. Rozkład prędkości i temperatury powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XZ, $Y = 0,6$ m dla wariantu C8.....	140
Rys. 8.29. Rozkład prędkości i temperatury powietrza z symulacji CFD na płaszczyźnie XY, $Z = -2,06$ m dla wariantu C8.....	141
Rys. 9.1. Bilans energii elektrycznej przy zastosowaniu paneli fotowoltaicznych	145
Rys. 9.2. Bilans kosztów za energię elektryczną przy zastosowaniu paneli fotowoltaicznych....	146
Rys. 9.3. Bilans emisji ditlenku węgla [tCO ₂ /rok] przy zastosowaniu paneli fotowoltaicznych .	146

Spis załączników

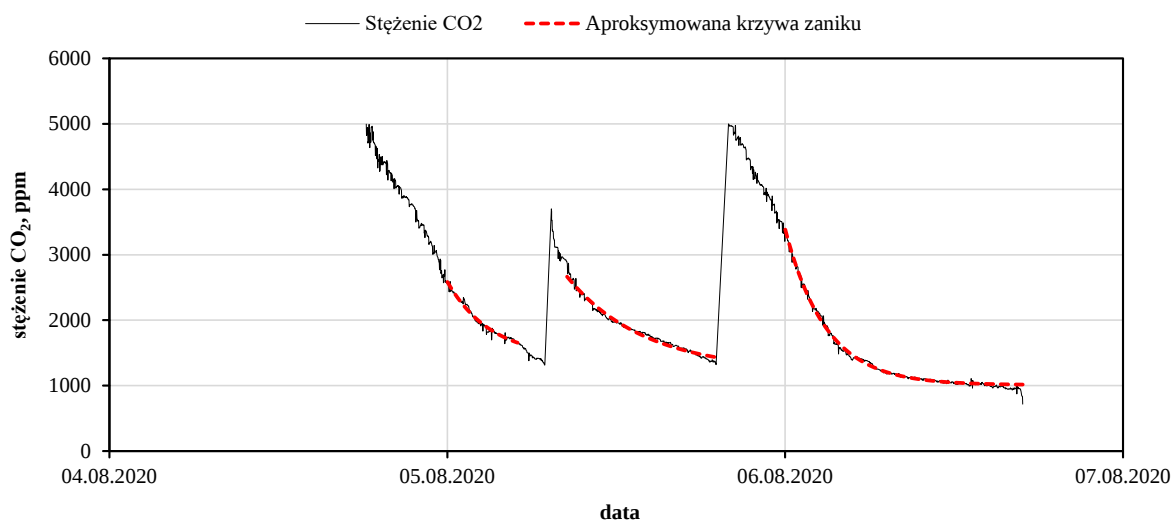
- Załącznik nr 1 – Krzywe zaniku stężenia gazu znacznikowego
- Załącznik nr 2 – Harmonogramy przebywania ludzi oraz profile zysków wewnętrznych
- Załącznik nr 3 – Dokumentacja doboru paneli fotowoltaicznych



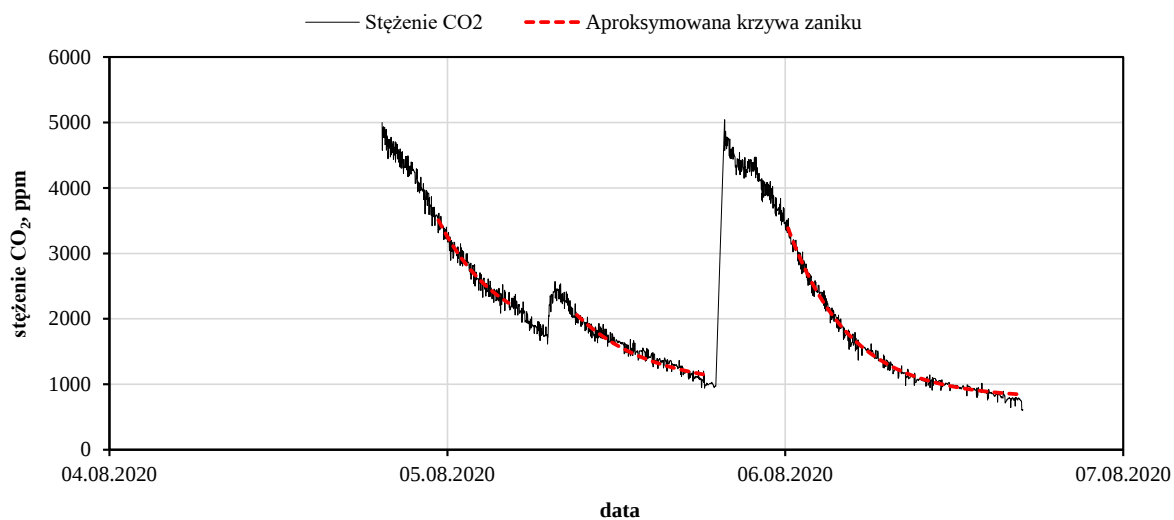
Rysunek Z1. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 1 podczas pomiaru 04.08-06.08.2020



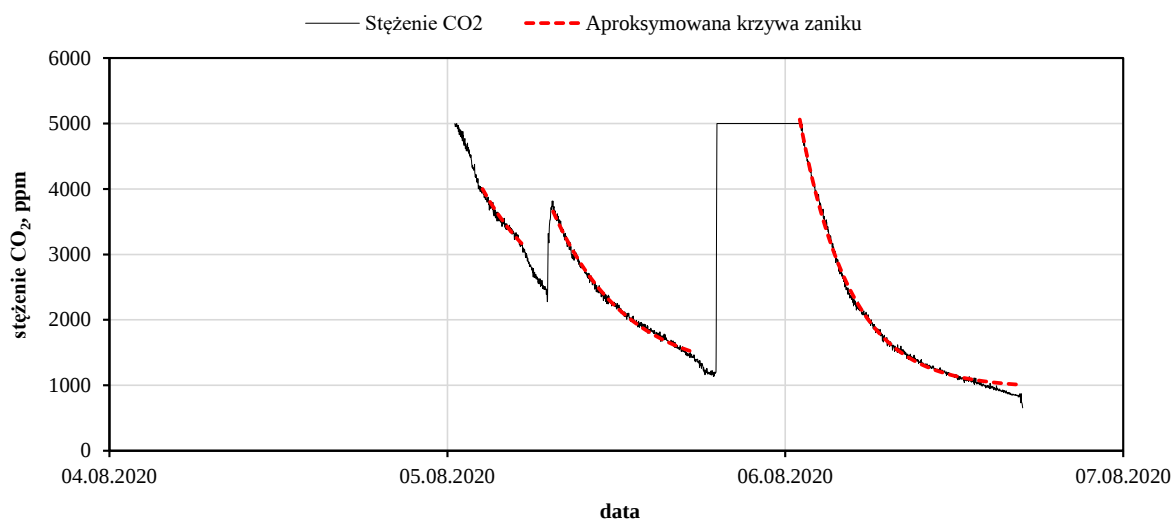
Rysunek Z2. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 2 podczas pomiaru 04.08-06.08.2020



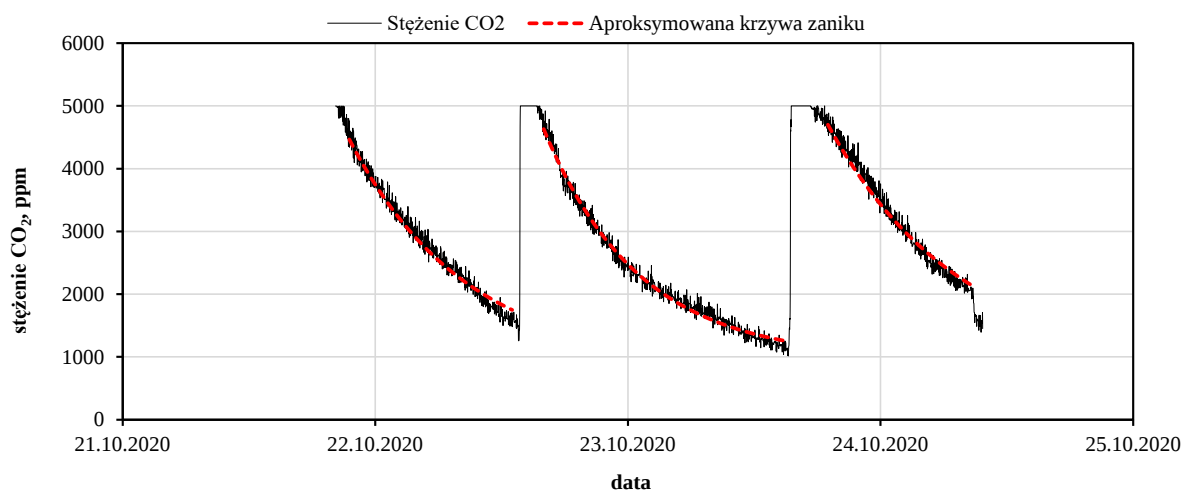
Rysunek Z3. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 3 podczas pomiaru 04.08-06.08.2020



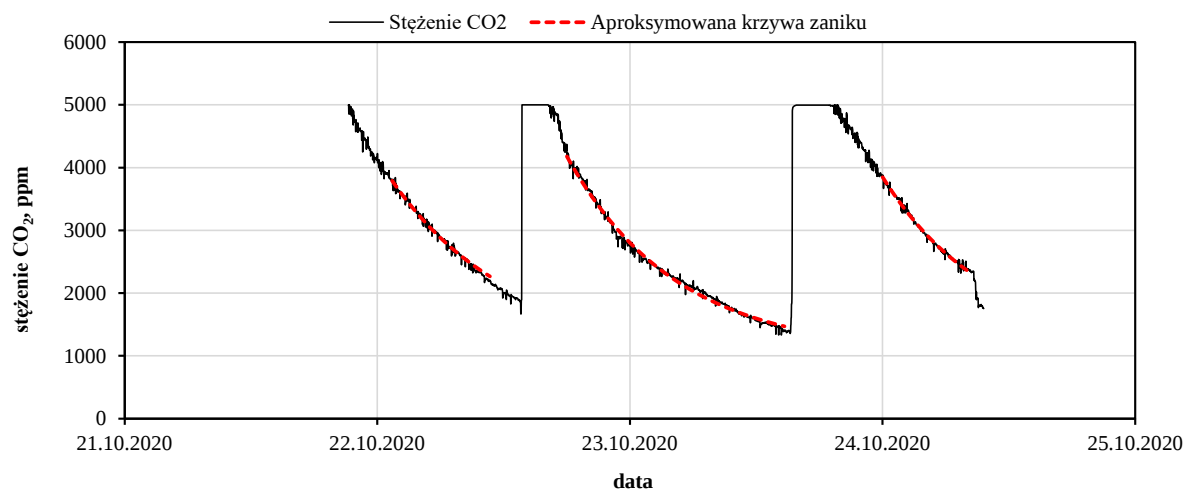
Rysunek Z4. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 4 podczas pomiaru 04.08-06.08.2020



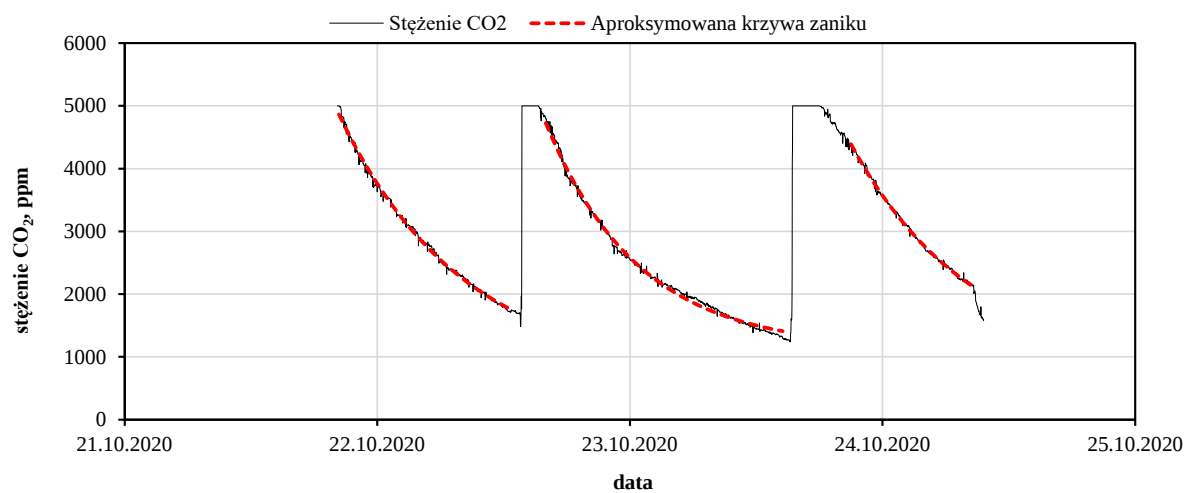
Rysunek Z5. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 5 podczas pomiaru 04.08-06.08.2020



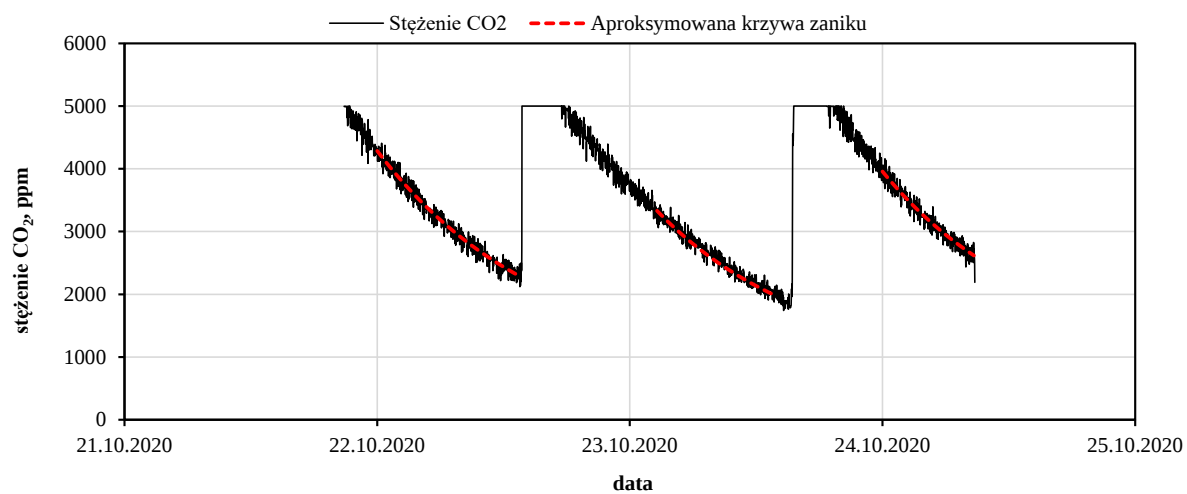
Rysunek Z6. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 1 podczas pomiaru 21-24.10.2020



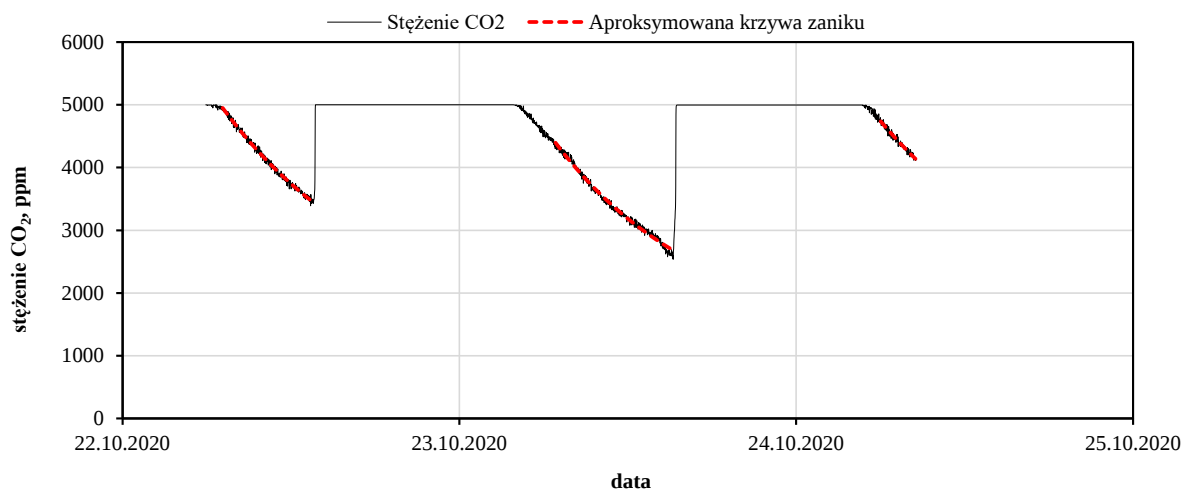
Rysunek Z7. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 2 podczas pomiaru 21-24.10.2020



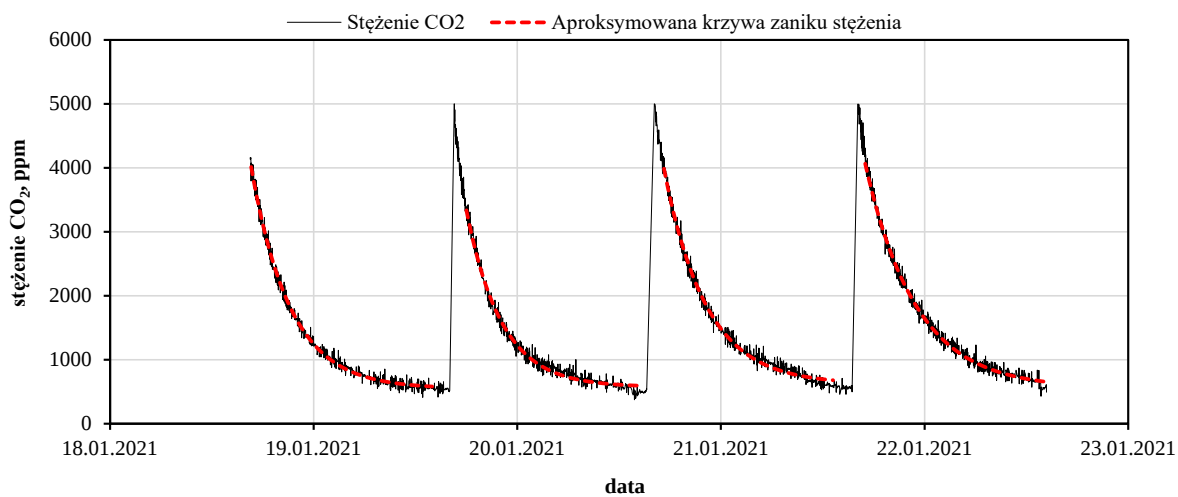
Rysunek Z8. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 3 podczas pomiaru 21-24.10.2020



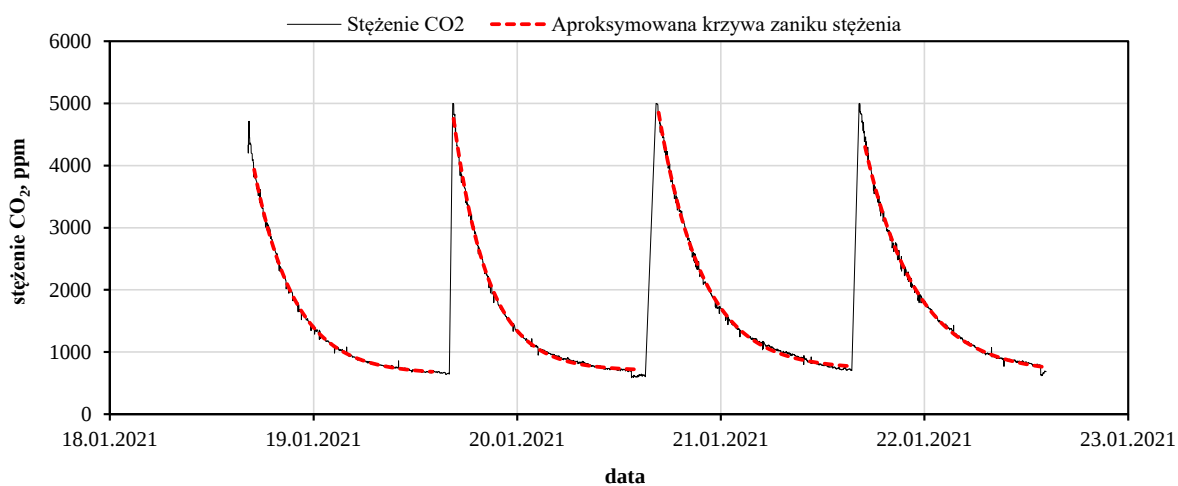
Rysunek Z9. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 4 podczas pomiaru 21-24.10.2020



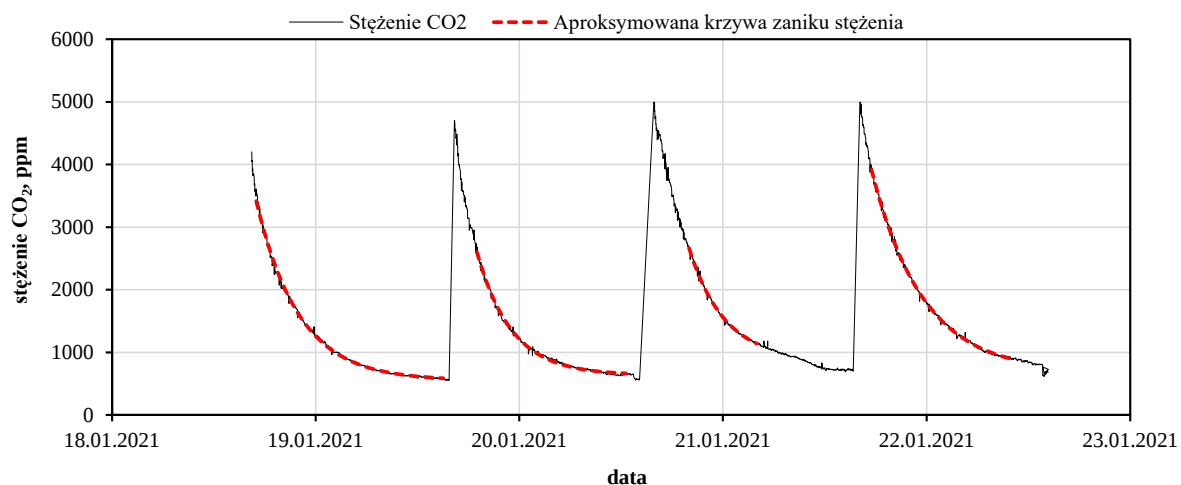
Rysunek Z10. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 5 podczas pomiaru 21-24.10.2020



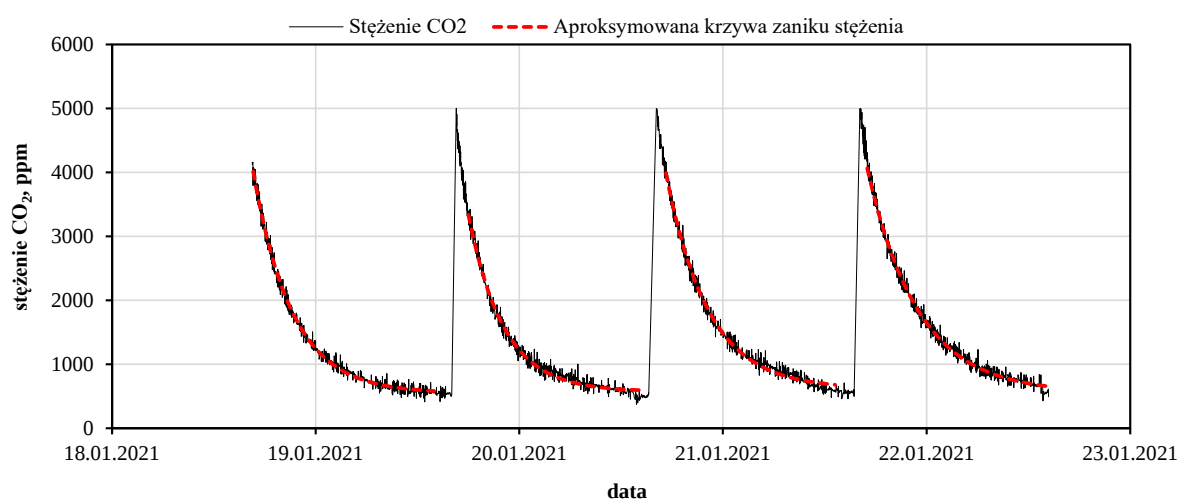
Rysunek Z11. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 1 podczas pomiaru 18.01-23.01.2021



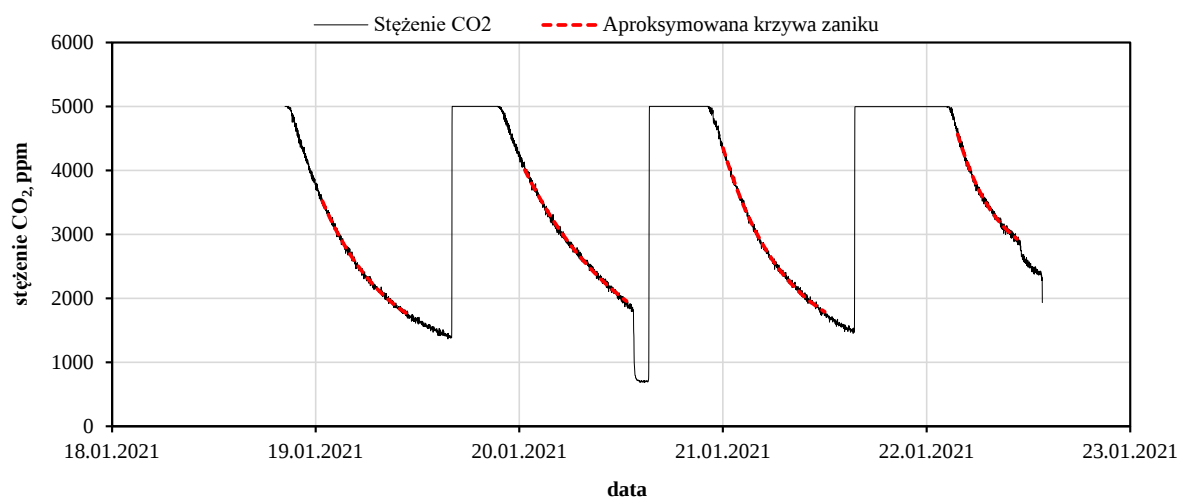
Rysunek Z12. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 2 podczas pomiaru 18.01-23.01.2021



Rysunek Z13. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 2 podczas pomiaru 18.01-23.01.2021



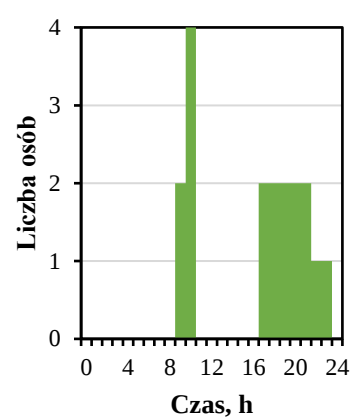
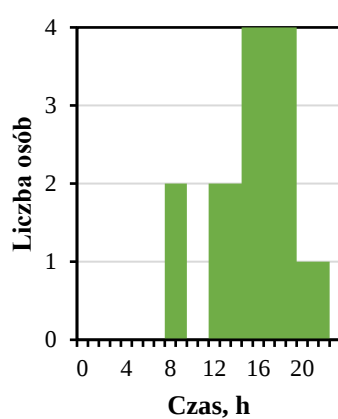
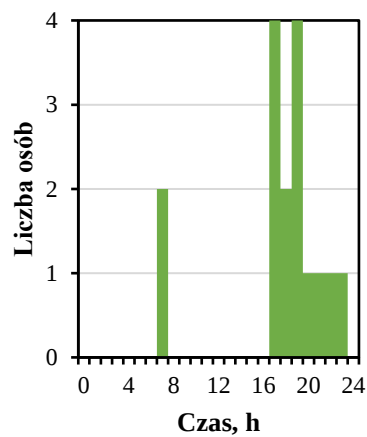
Rysunek Z14. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 4 podczas pomiaru 18.01-23.01.2021



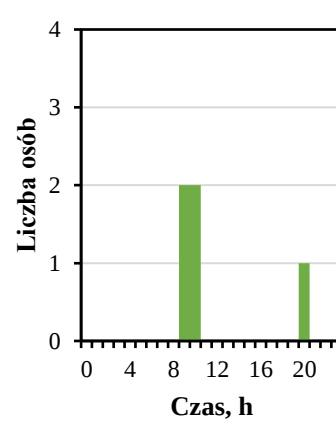
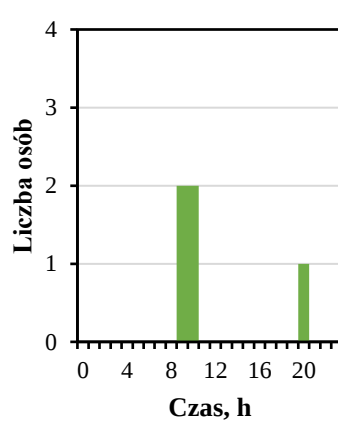
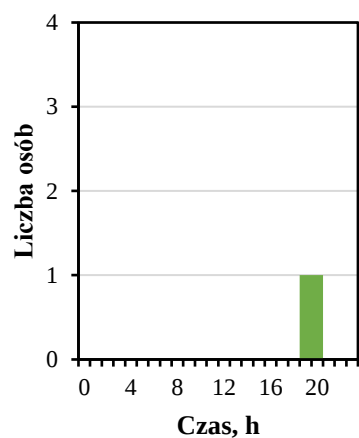
Rysunek Z15. Krzywa zaniku stężenia dla miernika nr 5 podczas pomiaru 18.01-23.01.2021

Harmonogramy przebywania ludzi:

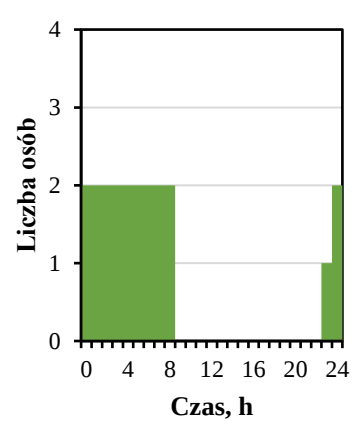
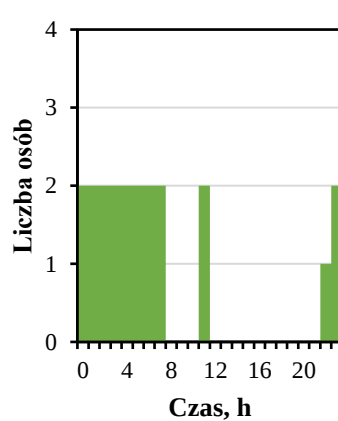
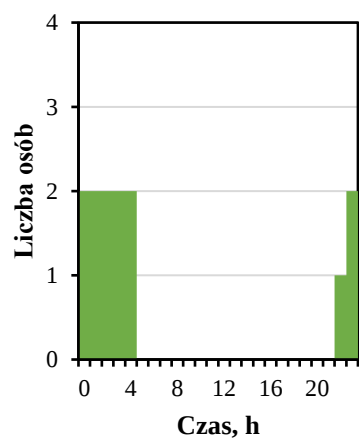
Salon



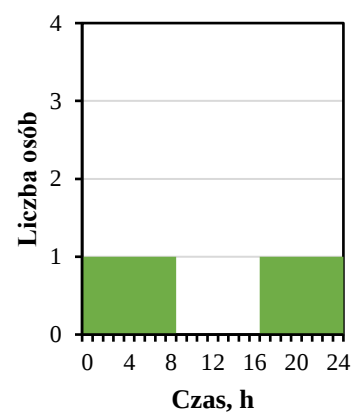
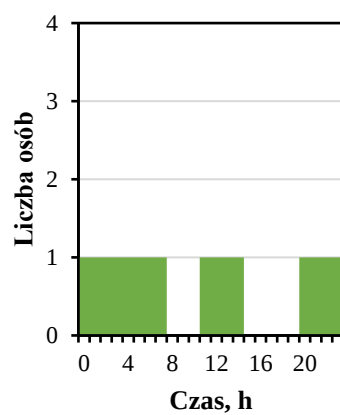
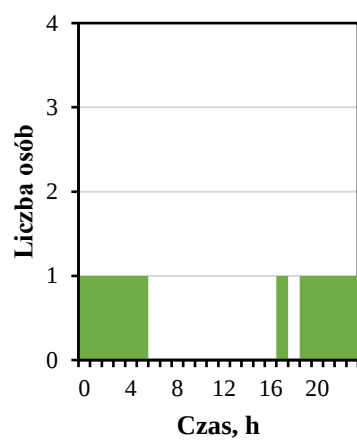
Gabinet



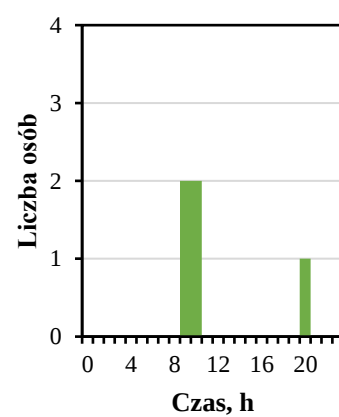
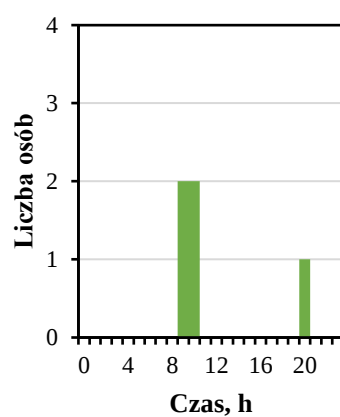
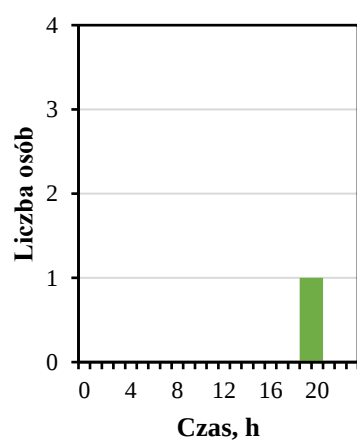
Sypialnia



Pokoje 1 i 2



Łazienka 2



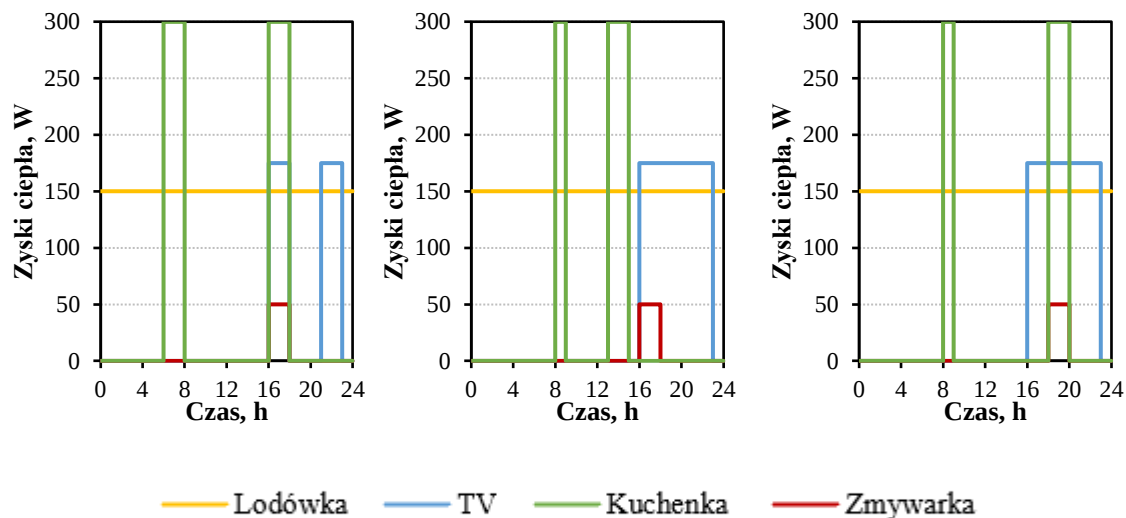
Od poniedziałku do piątku

Sobota

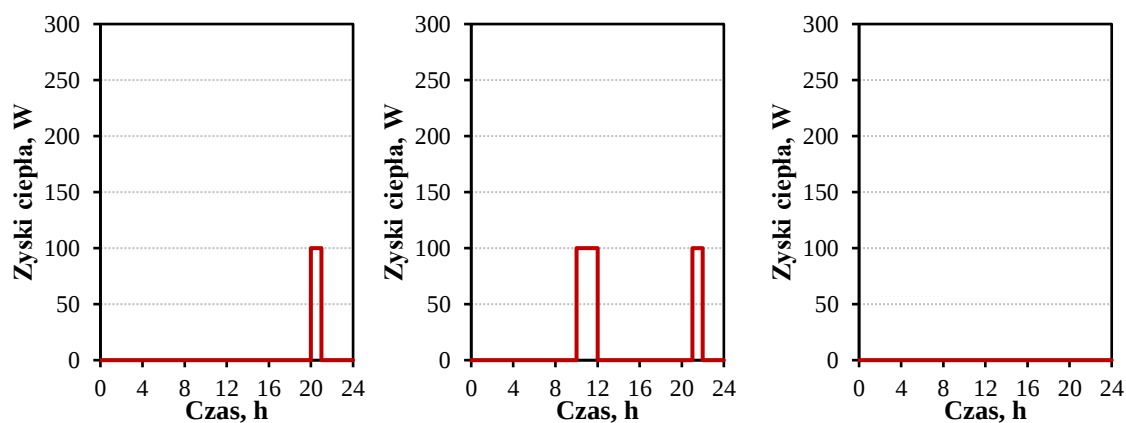
Niedziela

Profil zysków wewnętrznych od urządzeń elektrycznych

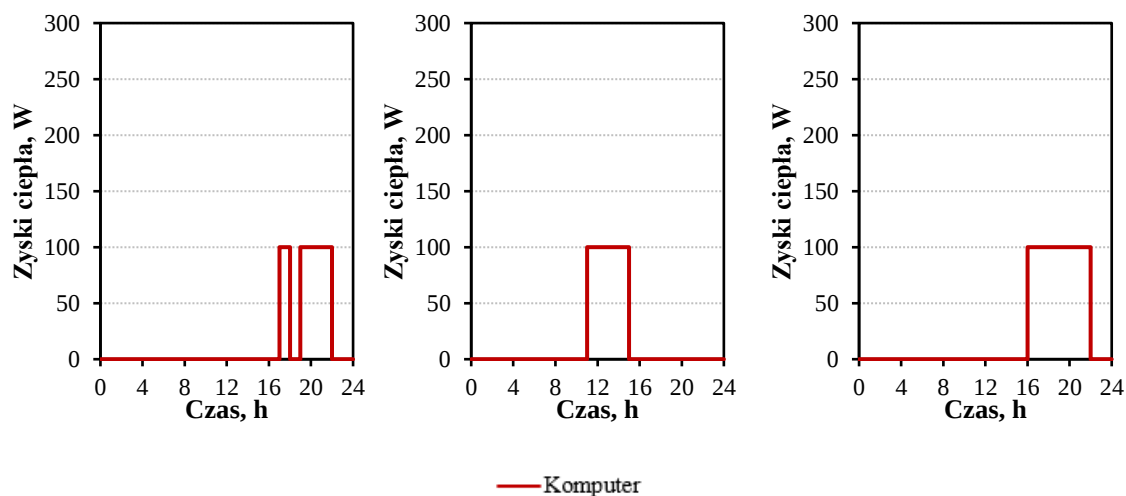
Salon



Gabinet



Pokój 1

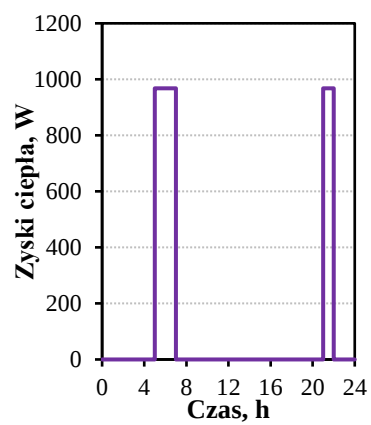


Od poniedziałku do piątku

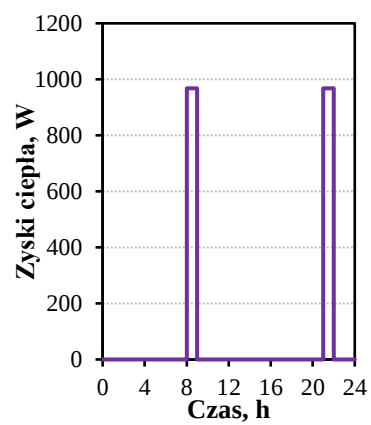
Sobota

Niedziela

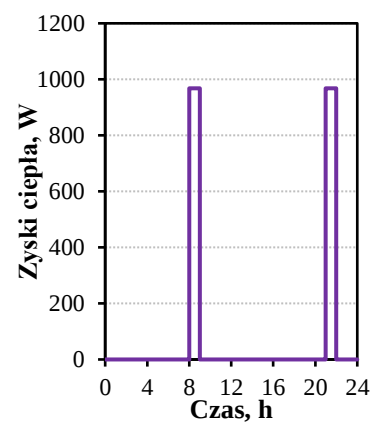
Łazienka 2



Od poniedziałku do piątku



Sobota



Niedziela

— Kąpiel

Oferta 1

Oferta obejmuje dostawę materiałów i kompleksowe wykonanie instalacji fotowoltaicznej dla domu jednorodzinnego zlokalizowanego w miejscowości Rogoźnik. Spośród wielu możliwych rozwiązań proponuję wariant będący wysokiej jakości, który spełnia wszystkie Pani wymagania i oczekiwania.

1. PROPONOWANE ROZWIĄZANIE:

Założenia:

Dach skośny kryty dachówką

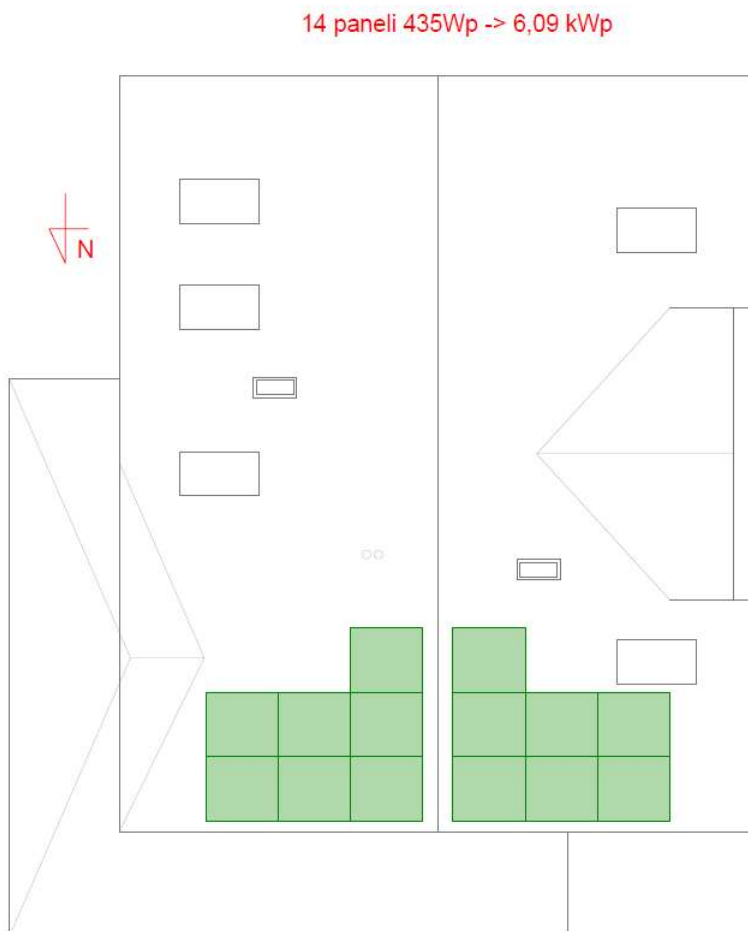
Kąt nachylenia: 42st.

Orientacja względem stron świata:
wschód/ zachód

Roczne zużycie energii: 4700kWh

Instalacja Fotowoltaiczna o łącznej mocy 6,09 kW

- Panele **Kensol KS435MNHT-BI** o mocy **435Wp** – 14szt.
- Inwerter **Fronius SYMO GEN24 5.0 PLUS** trójfazowy 5kW
- Złącza szeregowo do podłączenia paneli
- Przewody elektryczne podłączeniowe
- Zabezpieczenie elektryczne po stronie AC i DC
- Kompletna konstrukcja montażowa na dachu skośnym wschód-zachód
- Materiały instalacyjne i uzupełniające
- Robocizna – montaż i uruchomienie
- Projekt instalacji



Łączna Kwota: 26 542,51 zł netto

Łączna Kwota: 28 665,92zł brutto (w tym 8% VAT)

Uwaga:

Oferta ważna 14 dni od daty przedstawienia.

Oferta 2

Oferta obejmuje dostawę materiałów i kompleksowe wykonanie instalacji fotowoltaicznej dla domu jednorodzinnego zlokalizowanego w miejscowości Rogoźnik. Spośród wielu możliwych rozwiązań proponuję wariant będący wysokiej jakości, który spełnia wszystkie Pani wymagania i oczekiwania.

1. PROPONOWANE ROZWIĄZANIE:

Założenia:

Dach skośny kryty dachówką

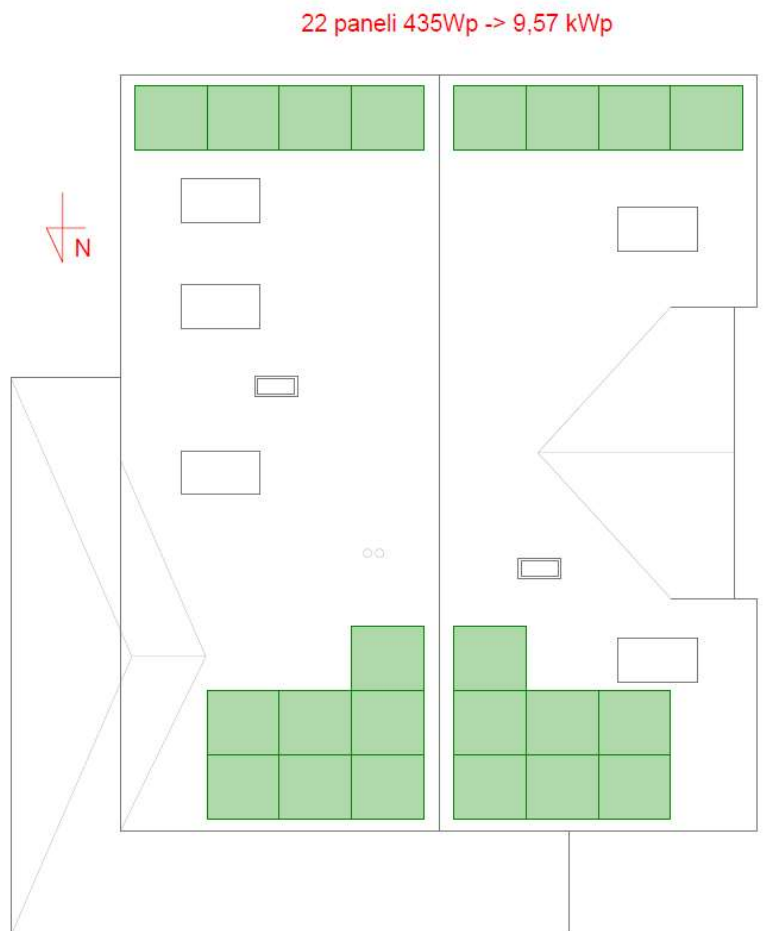
Kąt nachylenia: 42st.

Orientacja względem stron świata:
wschód/ zachód

Roczne zużycie energii: 7000kWh

Instalacja Fotowoltaiczna o łącznej mocy 9,57 kW

- Panele **Kensol KS435MNHT-BI** o mocy **435Wp** – 22szt.
- Inwerter **Fronius SYMO GEN24 8.0 PLUS** trójfazowy 8kW
- Złącza szeregowo do podłączenia paneli
- Przewody elektryczne podłączeniowe
- Zabezpieczenie elektryczne po stronie AC i DC
- Kompletna konstrukcja montażowa na dachu skośnym wschód-zachód
- Materiały instalacyjne i uzupełniające
- Robocizna – montaż i uruchomienie
- Projekt instalacji



Łączna Kwota: 39 070,54 zł netto
Łączna Kwota: 42 196,18zł brutto (w tym 8% VAT)

Uwaga:

Oferta ważna 14 dni od daty przedstawienia.

Przegląd inst. PV

Projekt
Rogożnik 6 kWp

Klient

Lokaliz.
42 Rogożnik, Polska

Instalator

Naz.
Demo Mode

Adres
null null, null

Kontakt

Firma



Roczne
 nasłonecznienie
1,074 kWh / m²



Sieć
1-ph / 3-ph



Zużycie energii
4,700 kWh / Rok



Koszty ener.
0.00 PLN / kWh



Roczny uzysk
5,486kWh



Moc PV
6.09kWp



Zużycie własne
33%



Samowystarczalność
39%



Oszcz. dzięki zuż. na
 potrz. włas.
0 PLN / Rok



Zys.z zas.sieci
0 PLN / Rok



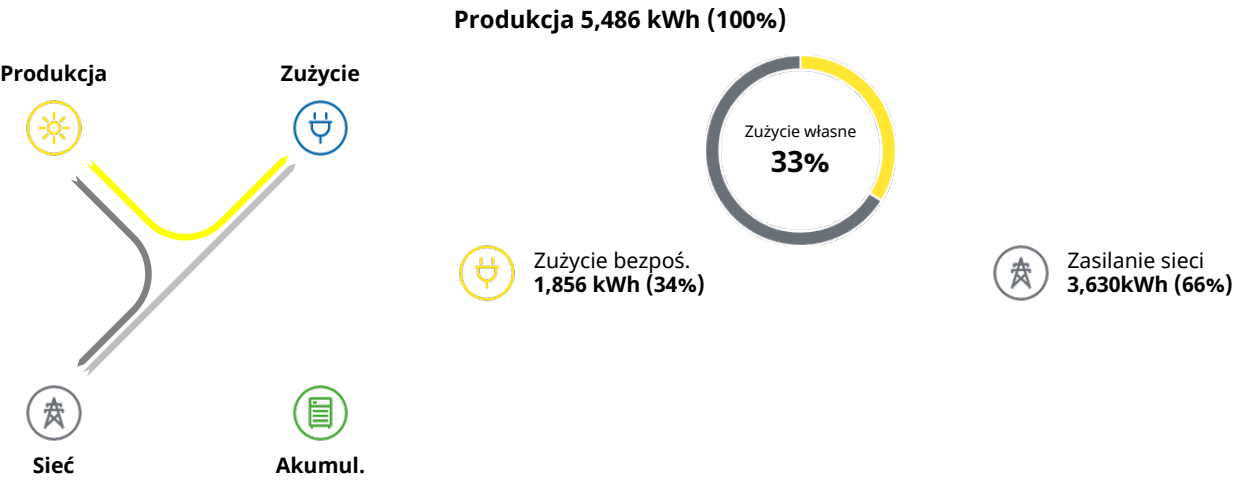
Rentow. instal.
-



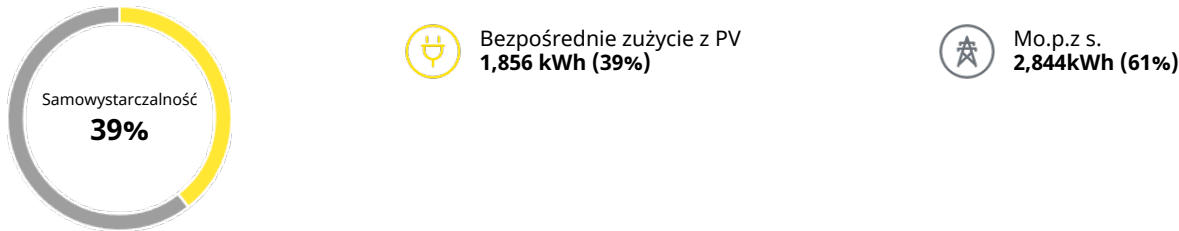
Oszczęd. CO2
3 t / Rok

Dodatkowe pole tekstowe:

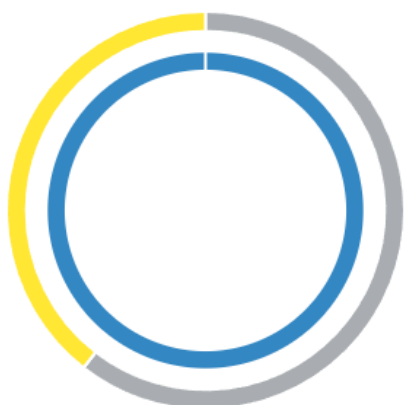
Przep.ener. (prognoza na 1 rok)



Zużycie 4,700 kWh (100%)
Jak pokrywane jest zużycie



Zużycie 4,700 kWh (100%)
Jak konsumpcja jest uzupełniana

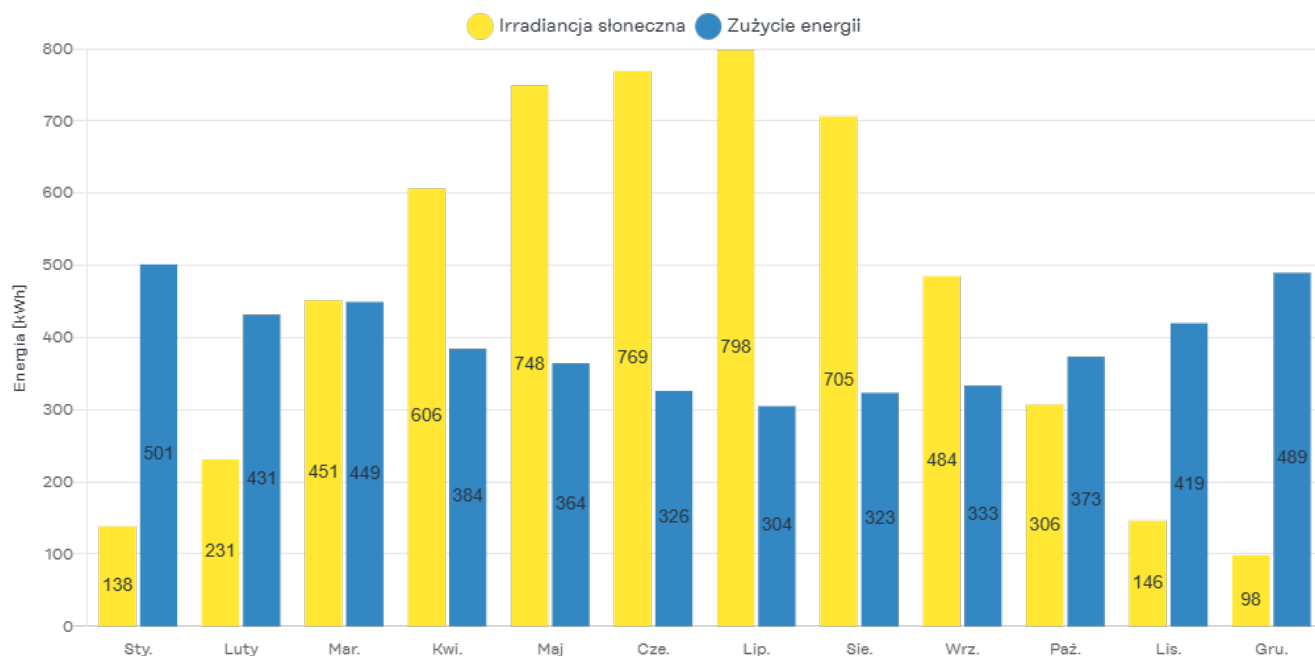


Gospodarstwo domowe
4,700 kWh (100%)

Bezpośrednie zużycie z PV

Mo.p.z s.
2,844 kWh (61%)

Bezpośrednie zużycie z PV
1,856 kWh (39%)



Łańcuchy fotowoltaiczne

Moc łączna
6.09 kWp

Moc łączna modułów
14

PV Array 1



Kąt
nachylenia
modułów

PV Array 2



Kąt
nachylenia
modułów
42 °



Kierunek
ustawienia
modułów
90 °



Kierunek
ustawienia
modułów
270 °



Moduły
7 x Kensol Sp. z o.o.
KS435MNHT-BI



Moduły
7 x Kensol Sp. z o.o.
KS435MNHT-BI



Moc PV
3.05 kWp



Moc PV
3.05 kWp

Falownik

Łączna moc AC
5.00 kVA

Łączna liczba falowników
1

Type of result
Automatically

1 x Symo GEN24 5.0

MAXIMUM FLEXIBILITY & FUTURE RELIABILITY

The Fronius Symo GEN24 with power classes ranging from 3.0 to 10.0 kW is the perfect solution for private households. With numerous features, these three-phase devices meet all customer needs. The Symo GEN24 is also available as inverter without hybrid functions with an integrated basic backup power supply (PV Point). With Fronius UP* the battery connection and Full Backup** feature can easily be activated. A software update with Fronius Solar.web (carried out by the installer) turns the Symo GEN24 to a Symo GEN24 Plus. This leads to maximal flexibility and future reliability because the battery connection and backup function can be upgraded at any time. The Symo GEN 24 boasts a light and compact design, an active cooling concept, and quick and easy installation and commissioning. The service concept, whereby individual parts can be replaced, also guarantees easy repair and therefore contributes to its sustainability credentials. * Please note that the availability of Fronius UP varies from country to country. You can find an overview of the specific country availability in the downloads.** The Full Backup option can be implemented with the Symo GEN24 Plus 6-10 kW.



Stosunek mocy
122%



Moc @ 25°C
6.09 kW



Współ.prądu
1.22

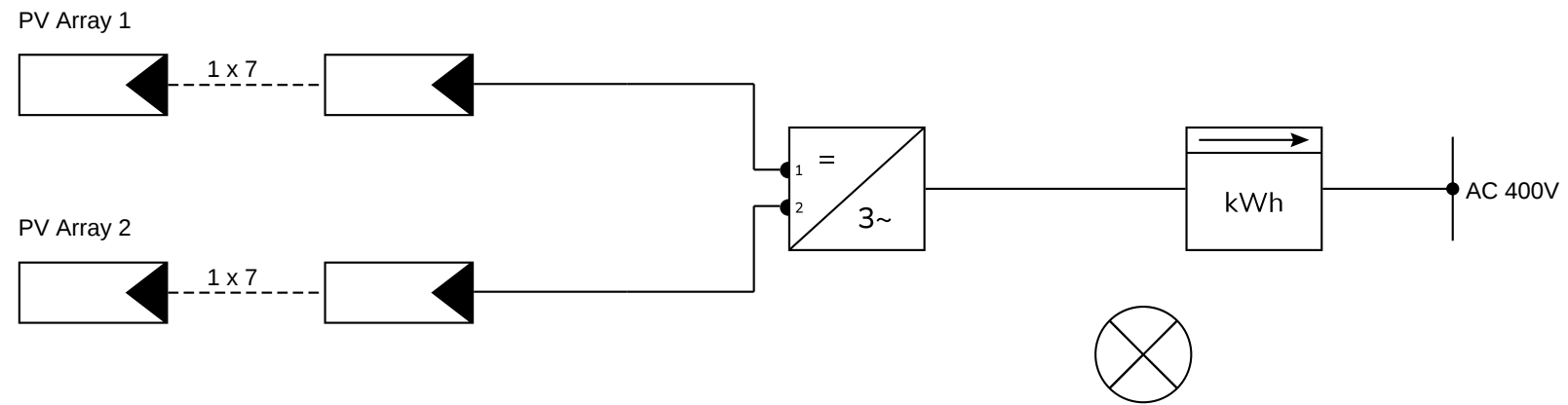


Łańcuchy×moduły
1 x 7



Łańcuchy×moduły
1 x 7

PV1	
Kolektor PV	1 x 7
Napięcie MPP 70 °C	197.26 V
Napięcie obw. otwartego przy -10 °C	292.32 V
Napięcie MPP przy 0 °C	244.30 V
Napięcie obw. otwartego przy 70 °C	238.56 V
MPP prąd przy 25 °C	13.39 A
Prąd zwarciovowy przy 25 °C	17.73 A
Moc MPP przy 25 °C	3.05 kWp
Montaż gPV	Nie
Montaż gPV/Złącze Y	Nie
Straty uzysku	Tak
PV2	
Kolektor PV	1 x 7
Napięcie MPP 70 °C	197.26 V
Napięcie obw. otwartego przy -10 °C	292.32 V
Napięcie MPP przy 0 °C	244.30 V
Napięcie obw. otwartego przy 70 °C	238.56 V
MPP prąd przy 25 °C	13.39 A
Prąd zwarciovowy przy 25 °C	17.73 A
Moc MPP przy 25 °C	3.05 kWp
Montaż gPV	Nie
Montaż gPV/Złącze Y	Nie
Straty uzysku	Tak



Przegląd inst. PV

Projekt
Rogożnik 6 kWp

Klient

Lokaliz.

42 Rogożnik, Polska

Instalator

Naz.
Demo Mode

Adres

null null, null

Kontakt

Firma



Roczne
nasłonecznienie
1,074 kWh / m²



Sieć
1-ph / 3-ph



Zużycie energii
7,000 kWh / Rok



Koszty ener.
0.00 PLN / kWh



Roczny uzysk
8,685kWh



Moc PV
9.57kWp



Zużycie własne
32%



Samowystarczalność
40%



Oszcz. dzięki zuż. na
potrz. włas.
0 PLN / Rok



Zys.z zas.sieci
0 PLN / Rok



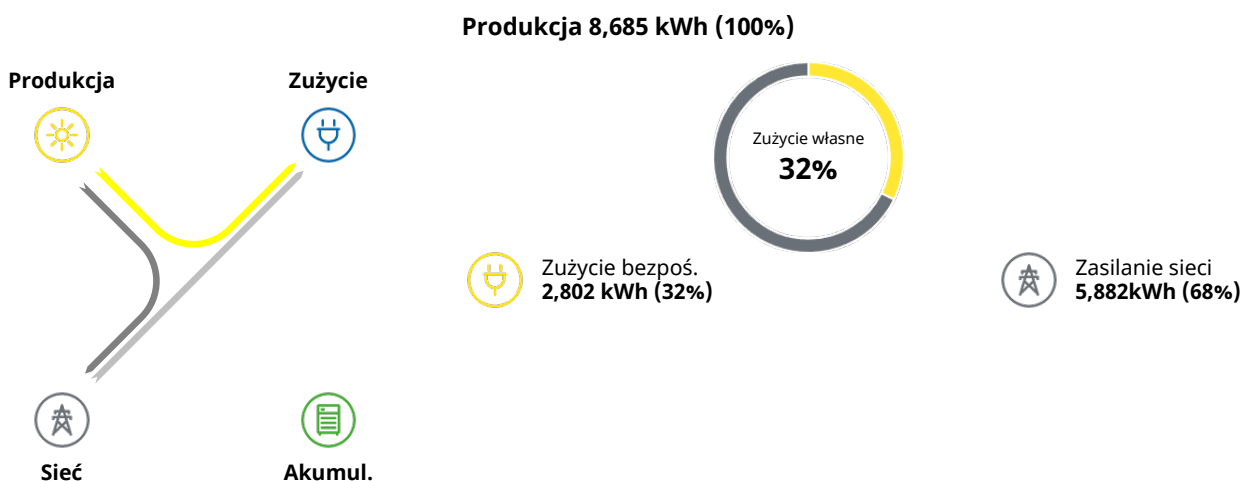
Rentow. instal.
-



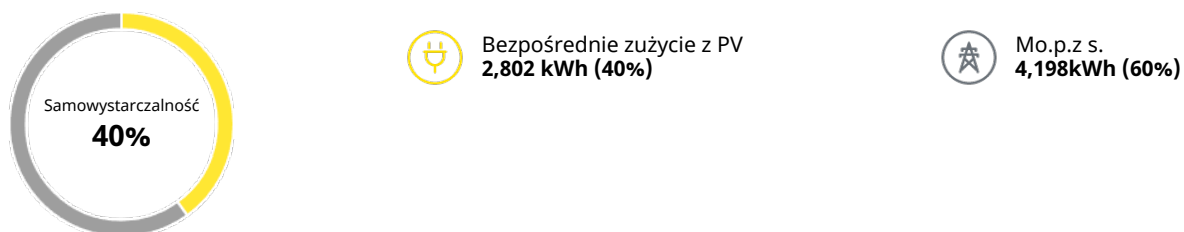
Oszczęd. CO2
5 t / Rok

Dodatkowe pole tekstowe:

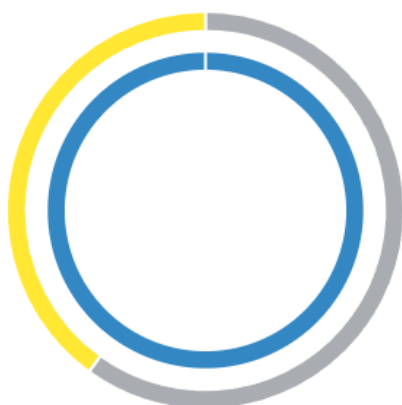
Przep.ener. (prognoza na 1 rok)



Zużycie 7,000 kWh (100%)
Jak pokrywane jest zużycie



Zużycie 7,000 kWh (100%)
Jak konsumpcja jest uzupełniana

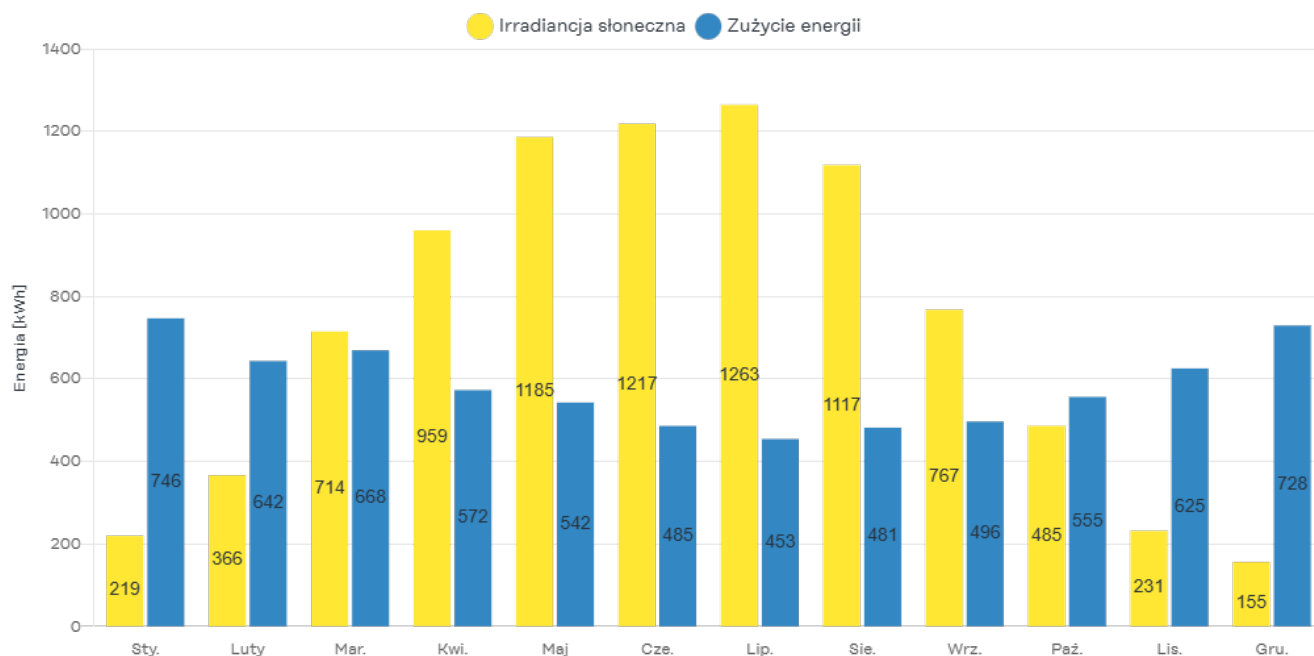


Gospodarstwo domowe
7,000 kWh (100%)

Bezpośrednie zużycie z PV

Mo.p.z.s.
4,198 kWh (60%)

Bezpośrednie zużycie z PV
2,802 kWh (40%)



Łańcuchy fotowoltaiczne

Moc łączna
9.57 kWp

Moc łączna modułów
22

PV Array 1



Kąt
nachylenia
modułów

PV Array 2



Kąt
nachylenia
modułów
42 °



Kierunek
ustawienia
modułów
90 °



Moduły
11 x Kensol Sp. z o.o.
KS435MNHT-BI



Moc PV
4.79 kWp



Kierunek
ustawienia
modułów
270 °



Moduły
11 x Kensol Sp. z o.o.
KS435MNHT-BI



Moc PV
4.79 kWp

Falownik

Łączna moc AC
8.00 kVA

Łączna liczba falowników
1

Type of result
Automatically

1 x Symo GEN24 8.0

MAXIMUM FLEXIBILITY & FUTURE RELIABILITY

The Fronius Symo GEN24 with power classes ranging from 3.0 to 10.0 kW is the perfect solution for private households. With numerous features, these three-phase devices meet all customer needs. The Symo GEN24 is also available as inverter without hybrid functions with an integrated basic backup power supply (PV Point). With Fronius UP* the battery connection and Full Backup** feature can easily be activated. A software update with Fronius Solar.web (carried out by the installer) turns the Symo GEN24 to a Symo GEN24 Plus. This leads to maximal flexibility and future reliability because the battery connection and backup function can be upgraded at any time. The Symo GEN 24 boasts a light and compact design, an active cooling concept, and quick and easy installation and commissioning. The service concept, whereby individual parts can be replaced, also guarantees easy repair and therefore contributes to its sustainability credentials. * Please note that the availability of Fronius UP varies from country to country. You can find an overview of the specific country availability in the downloads.** The Full Backup option can be implemented with the Symo GEN24 Plus 6-10 kW.



Stosunek mocy
120%



Moc @ 25°C
9.57 kW



Współ.prądu
1.20

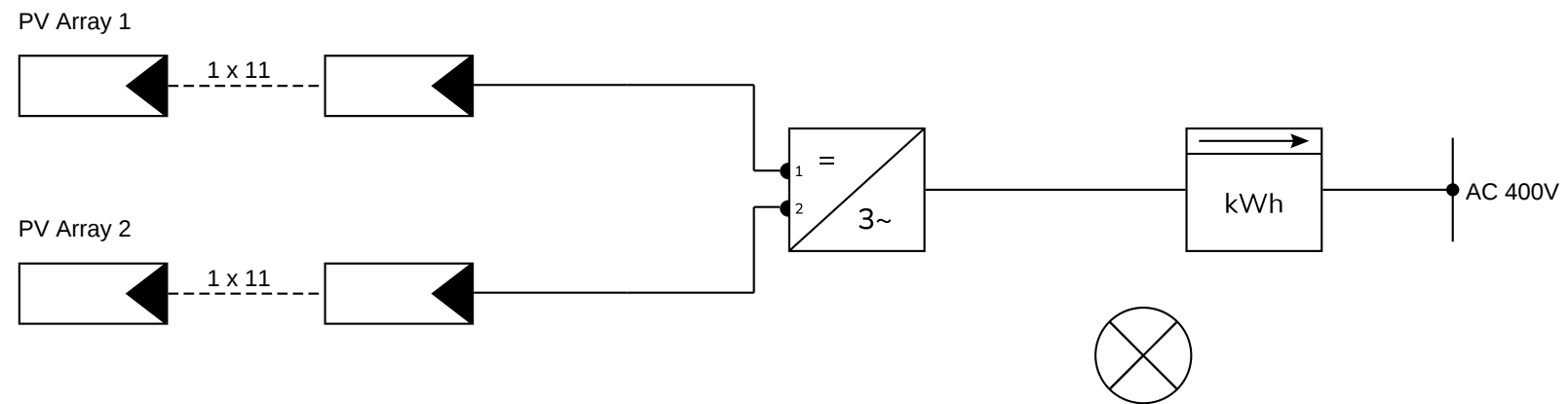


Łańcuchy×moduły
1 x 11



Łańcuchy×moduły
1 x 11

PV1	
Kolektor PV	1 x 11
Napięcie MPP 70 °C	309.98 V
Napięcie obw. otwartego przy -10 °C	459.36 V
Napięcie MPP przy 0 °C	383.90 V
Napięcie obw. otwartego przy 70 °C	374.88 V
MPP prąd przy 25 °C	13.39 A
Prąd zwarciovowy przy 25 °C	17.73 A
Moc MPP przy 25 °C	4.79 kWp
Montaż gPV	Nie
Montaż gPV/Złącze Y	Nie
Straty uzysku	Nie
PV2	
Kolektor PV	1 x 11
Napięcie MPP 70 °C	309.98 V
Napięcie obw. otwartego przy -10 °C	459.36 V
Napięcie MPP przy 0 °C	383.90 V
Napięcie obw. otwartego przy 70 °C	374.88 V
MPP prąd przy 25 °C	13.39 A
Prąd zwarciovowy przy 25 °C	17.73 A
Moc MPP przy 25 °C	4.79 kWp
Montaż gPV	Nie
Montaż gPV/Złącze Y	Nie
Straty uzysku	Tak



PERUN GLASS **DUO**

KS435MNHT-BI

Moduły Kensol wykorzystują specjalne szkło zwiększające przejrzystość. Moduły dwustronne mogą generować do 30% więcej energii w porównaniu do tradycyjnych paneli.



Polska marka
Polski gwarant

30

30-letnia gwarancja produktowa
30 lat liniowej gwarancji mocy



Więcej mocy przy
standardowym rozmiarze

TÜV

Certyfikat TÜV

MCS

Certyfikat MCS

435W

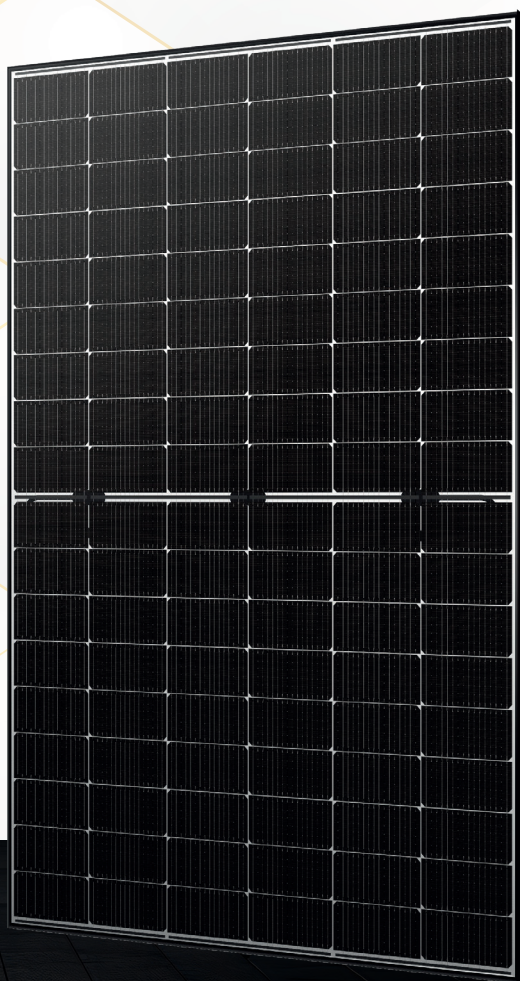
Maksymalna moc wyjściowa

22.27%

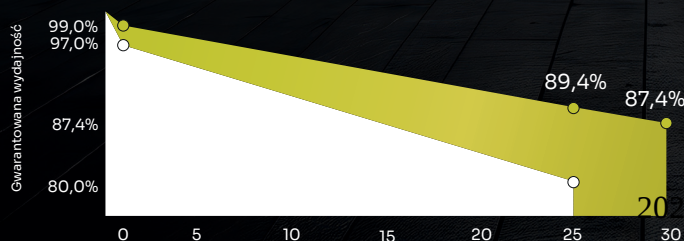
Maksymalna wydajność modułu

0~+5W

Tolerancja mocy wyjściowej



Gwarancja wydajności liniowej



Właściwości elektryczne STC*					
Typ modułu	KS415 MNHT-BI	KS420 MNHT-BI	KS425 MNHT-BI	KS430 MNHT-BI	KS435 MNHT-BI
Warunki testowania	Strona przednia	Strona przednia	Strona przednia	Strona przednia	Strona przednia
Moc szczytowa (Pmax) (W)	415	420	425	430	435
Napięcie MPP (Vmp) (V)	31.7	31.9	32.1	32.3	32.5
Prąd MPP (Imp)(A)	13.10	13.17	13.24	13.32	13.39
Napicie obwodu otwartego (Voc)(V)	37.7	37.9	38.1	38.3	38.4
Prąd zwarciov (Isc)(A)	13.91	13.98	14.05	14.12	14.18
Sprawność modułu (%)	21.25	21.51	21.76	22.02	22.27

**STC: Natężenie promieniowania 1000 W/m2, temperatura ogniwa 25°C, AM1.5
Powyższe dane mają jedynie charakter poglądowy, a rzeczywiste dane są zgodne z praktycznymi testami Tolerancji pomiaru mocy ±3%

Właściwości elektryczne NOCT*					
Warunki testowania	Strona przednia	Strona przednia	Strona przednia	Strona przednia	Strona przednia
Moc szczytowa (Pmax) (W)	315	318	322	326	330
Napięcie MPP (Vmp) (V)	29.8	30.0	30.2	30.3	30.5
Prąd MPP (Imp)(A)	10.56	10.62	10.67	10.74	10.82
Napięcie obwodu otwartego (Voc)(V)	36.0	36.2	36.4	36.6	36.8
Prąd zwarciov (Isc)(A)	11.22	11.27	11.33	11.38	11.44

*NOCT: Natężenie promieniowania 800 W/m2 Temperatura otoczenia 20°C, prędkość wiatru 1 m/s

Właściwości operacyjne	
Temperatura pracy (°C)	-40°C~+85°C
Maksymalne napięcie systemu(V)	1500V DC (IEC)
Maksymalny bezpiecznik szeregowy (A)	30
Tolerancja mocy	0~+5W
Dwudzielność*	80%

*Dwustronność=Pmaxtył (STC)/Pmaxprzód (STC), Tolerancja dwustronności:±5%

Współczynnik temperatury	
Współczynnik temperaturowy Pmax*	-0.300%/°C
Współczynnik temperatury Voc	-0.250%/°C
Współczynnik temperatury Isc	+0.045%/°C
Nominalna temperatura robocza ogniwa (NOCT)	42±2°C

*Współczynnik temperaturowy Pmax±0.03%/°C

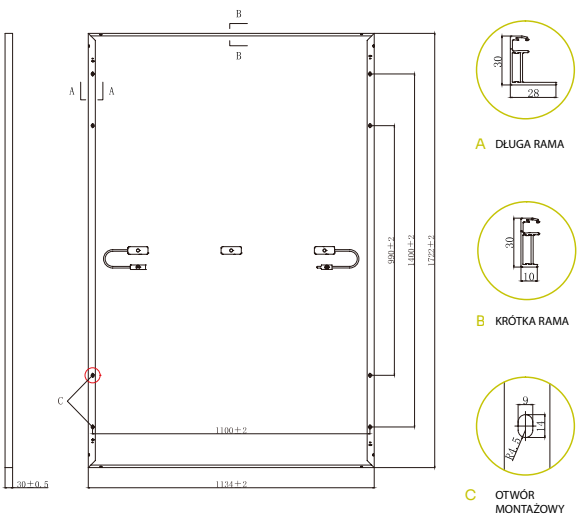
Właściwości mechaniczne	
Rozmiar ogniwa	182.00mm*91.00mm
Liczba ogniw	108pcs(12*9)
Wymiary modułu	1722mm*1134mm*30mm
Waga	24.5kg
Szkła przednie/tylne*	2.0mm/2.0mm (powłoka antyrefleksyjna)
Rama	Anodyzowany stop aluminium
Puszka przyłączeniowa	IP68 (3 diody)
Długość kabla	4.0mm ² , +1200mm/-1200mm (długość kabla można dostosować)
Złącze	MC4 EVO2

*Szkło wzmacniane termicznie

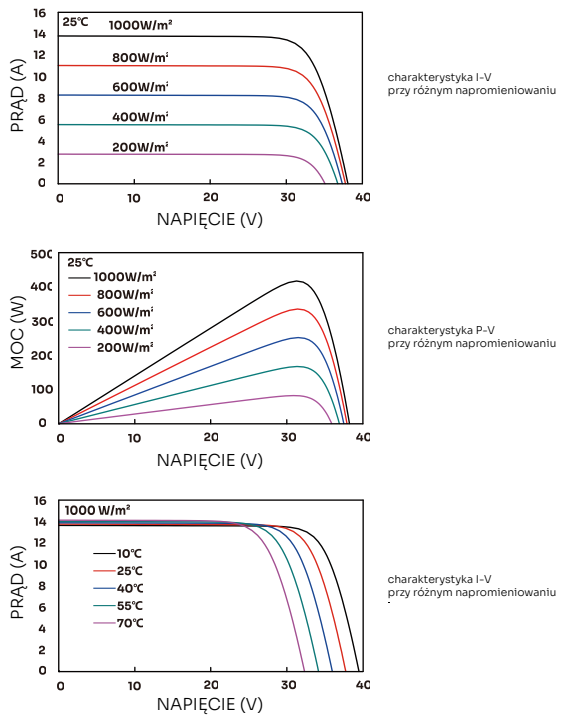
Z różnym przyrostem mocy (na przykładzie 415 W)					
Przyrost mocy (%)	Moc szczytowa (Pmax) (W)	Napięcie MPP (Vmp)(V)	Prąd MPP (Imp)(A)	Napięcie obwodu otwartego (Voc) (V)	Prąd zwarciov (Isc) (A)
10	448	31.7	14.13	37.7	14.99
15	465	31.7	14.65	37.7	15.54
20	481	31.7	15.17	37.7	16.08
25	498	31.7	15.69	37.7	16.62
30	515	31.8	16.20	37.8	17.16

Ze względu na ciągłe innowacje techniczne, powyższe dane techniczne mogą ulec odpowiedniej modyfikacji. KENSOL informuje, że ma wyłączne prawo do wprowadzania zmian w dowolnym momencie bez uprzedzenia.

Rysunek techniczny (jednostka: mm)



Krzywe charakterystyczne



Konfiguracja opakowania

Typ opakowania	20'GP	40'GP	40'HQ
Sztuka/Paleta		36	
Paleta/pojemnik	6	13	26
Sztuka/Pojemnik	216	468	936

*Specyfikacja i kluczowe funkcje opisane w tym arkuszu danych mogą się nieznacznie różnić i nie są gwarantowane. Ze względu na ciągłe innowacje, rozwój R&D, KENSOL Sp. z o.o. zastrzega sobie prawo do wprowadzania zmian w informacjach opisanych w niniejszym dokumencie w dowolnym czasie i bez uprzedzenia. Należy zawsze uzyskać najnowszą wersję karty katalogowej, która zostanie należycie włączona do wiążącej umowy zawartej przez strony, regulującej wszystkie transakcje związane z zakupem i sprzedażą produktów opisanych w niniejszym dokumencie.

FRONIUS SYMO GEN24 PLUS

Falownik hybrydowy ze zintegrowaną funkcją zasilania rezerwowego¹⁾



Komunikacja
Ethernet i WiFi



Dynamic Peak
Manager



Technologia
Multi Flow



SuperFlex
Design



Pełne zasilanie
rezerwowo¹⁾



PV Point
podstawowe zasilanie rezerwowo



Wyprodukowano
w Austrii / UE



Fronius SYMO GEN24 Plus o klasach mocy od 3.0 do 10.0 kW jest idealnym falownikiem hybrydowym dla prywatnych gospodarstw domowych i małych firm. Dzięki różnorodnym funkcjom dostępnym w standardzie, zaspokaja potrzeby każdego klienta.

Falownik GEN24 Plus spełnia wszystkie oczekiwania dzięki licznym opcjom, takim jak funkcje zarządzania energią, połączenie WLAN w standardzie, łączność Ethernet i łatwa integracja komponentów innych firm. W szczególności dzięki różnym opcjom zasilania rezerwowego (PV Point dla falowników 3.0 do 10 kW i pełne zasilanie rezerwowo¹⁾ dla falowników od 6.0 do 10.0).

DANE TECHNICZNE FRONIUS SYMO GEN24 PLUS (3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0)

DANE WEJŚCIOWE	SYMO GEN24 3.0 PLUS	SYMO GEN24 4.0 PLUS	SYMO GEN24 5.0 PLUS	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Liczba trackerów MPP	2					
Maks. użyteczny prąd wejściowy (I _{dc max} dla MPPT1 / MPPT2)	12.5 A / 12.5 A			25 A / 12.5 A		
Maks. prąd zwarciaowy dla pola modułów (MPPT1/MPPT2)	18.75 A / 18.75 A			37.5 A / 18.75 A		
Zakres napięcia wejściowego (U _{dc min} - U _{dc max})	80 V - 1,000 V					
Znamionowe napięcie wejściowe (U _{dc,n})	610 V					
Napięcie rozpoczęcia pracy (U _{dc start})	80 V					
Użyteczny zakres napięć MPP	80 V - 800 V					
Ilość podłączeń DC (MPPT1 / MPPT2)	2 / 1					
Maks. użyteczna moc DC (MPPT1/MPPT2/ (sumar.)	3,150 / 3,150 / 3,150 W	4,180 / 4,180 / 4,180 W	5,200 / 5,200 / 5,200 W	6,220 / 6,000 / 6,220 W	8,260 / 6,000 / 8,260 W	10,300 / 6,000 / 10,300 W
Maks. moc generatora PV (MPPT1/MPPT2/ (sumar.)	4.5 / 4.5 / 4.5 kWpeak	6 / 6 / 6 kWpeak	6.5 / 6.5 / 7.5 kWpeak	7.5 / 6.5 / 9 kWpeak	10 / 7 / 12 kWpeak	12.5 / 7.5 / 15 kWpeak

DANE WYJŚCIOWE	SYMO GEN24 3.0 PLUS	SYMO GEN24 4.0 PLUS	SYMO GEN24 5.0 PLUS	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Moc znamionowa AC (P _{ac,n})	3000 W	4000 W	5000 W	6,000 W	8,000 W	10,000 W
Maks. moc wyjściowa / Znamionowa moc pozorna	3000 VA	4000 VA	5000 VA	6,000 VA	8,000 VA	10,000 VA
Znamionowy prąd wyjściowy AC (220Vac / 230Vac)	4.5 / 4.3 A	6.1 / 5.8 A	7.6 / 7.2 A	9.1 / 8.7 A	10.6 / 10.1 A	12.1 / 11.6 A
Przyłącze sieciowe (zakres napięcia)	3~NPE 400 V / 230 V lub 3~NPE 380 V / 220 V (+20 % / - 30%)					
Częstotliwość (zakres częstotliwości)	50 Hz / 60 Hz (45 Hz – 66 Hz)					
Współczynnik zawartości harmonicznych THD	< 3.5 %					
Współczynnik mocy (cos φ _{ac,n})	0.7 - 1 ind. / poj.					
Zasilanie awaryjne	x			3~NPE 400 V / 230 V		

DANE TECHNICZNE FUNKCJI PV POINT / FULL BACKUP ¹⁾	SYMO GEN24 3.0 PLUS	SYMO GEN24 4.0 PLUS	SYMO GEN24 5.0 PLUS	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Nominalna moc wyjściowa PV Point / full backup ¹⁾	3,000 VA / x			3,000 VA / 6,000 VA	3,000 VA / 8,000 VA	3,000 VA / 10,000 VA
Nominalna moc na fazę full backup ¹⁾	x			3.68 kVA		
Przyłącze sieciowe (zakres napięcia) PV Point	1 ~ NPE 220 V / 230 V					
Przyłącze sieciowe (zakres napięcia) full backup ¹⁾	x			3~NPE 400V/230V lub 3~NPE 380V/220V		
Czas przełączenia	< 90 sekund					

PODŁĄCZENIE AKUMULATORA	SYMO GEN24 3.0 PLUS	SYMO GEN24 4.0 PLUS	SYMO GEN24 5.0 PLUS	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Ilość podłączeń DC	1					
Maks. prąd wejściowy (I _{dc max})	12.5 A			22 A		
Zakres wejściowego napięcia DC (U _{dc min} - U _{dc max})	160 V - 500 V					
Maks. moc wejściowa/wyjściowa ²⁾	3,150 W	4,180 W	5,200 W	6,220 W	8,260 W	10,300 W
Maks. moc ładowania od strony AC	3 000 W	4 000 W	5 000 W	6 000 W	8 000 W	10 000 W

204

DANE TECHNICZNE FRONIUS SYMO GEN24 PLUS (3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0)

DANE OGÓLNE	SYMO GEN24 3.0 PLUS	SYMO GEN24 4.0 PLUS	SYMO GEN24 5.0 PLUS	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Wymiary (wysokość x szerokość x głębokość)	530 x 474 x 165 mm		595 x 529 x 180 mm			
Waga (falownik / z opakowaniem)	15,6 / 19,4 kg		23,4 / 28,5 kg			
Stopień ochrony			IP 66			
Klasa ochronności			1			
Zużycie energii w nocy			< 10 W			
Kategoria przepięciowa (DC/AC) ³⁾			2 / 3			
Topologia falownika			Beztransformatorowy			
Chłodzenie			Regulowana wymuszona wentylacja			
Montaż			Montaż wewnętrzny lub na zewnątrz budynków			
Zakres temperatur otoczenia			-25 - +60 °C			
Dopuszczalna wilgotność powietrza			0 - 100 %			
Emisja hałasu	< 36 dB (A)		< 47 dB (A)			
Maks. wysokość montażu			3,000 m / 4,000 m (nieograniczony / ograniczony zakres napięcia)			
Zaciski przyłączeniowe DC do PV			3x DC+ oraz 3x DC- wtykowe zaciski sprężynowe 2.5 - 10 mm ²			
Zaciski przyłączeniowe DC do akumulatora			1x BATT+ oraz 1x BATT- wtykowe zaciski sprężynowe 2.5 - 10 mm ²			
Zaciski przyłączeniowe AC			5x AC wtykowe zaciski sprężynowe 1.5 - 10 mm ²			
			3x zasilanie awaryjne wtykowe zaciski sprężynowe 1.5mm ² - 10mm ²			
			5x PE-zaciski śrubowe 2.5 - 16 mm ²			
Certyfikaty i zgodność z normami			IEC 62109, IEC 62116, IEC 61727, IEC 62909, VDE 0126, VDE AR-N4105, AS/NZS 4777.2, EN 50549, CEI 0-21, G 98, R25 ⁴⁾			
Funkcje zasilania awaryjnego	PV Point		PV Point lub full backup ¹⁾			
Kompatybilne typy akumulatorów			BYD Battery-Box Premium HVS/HVM ⁵⁾			
Kraj produkcji			Austria			

SPRAWNOŚĆ	SYMO GEN24 3.0 PLUS	SYMO GEN24 4.0 PLUS	SYMO GEN24 5.0 PLUS	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Maks. sprawność	98.1 %	98.2 %	98.2 %		98.2 %	
Europejska sprawność ważona (η _{EU})	96.7 %	97.2 %	97.5 %	97.7 %	97.8 %	97.9 %
Sprawność wyszukiwania MPP	> 99.9 %					

ZABEZPIECZENIA	SYMO GEN24 3.0 PLUS	SYMO GEN24 4.0 PLUS	SYMO GEN24 5.0 PLUS	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Pomiar izolacji DC			Tak			
Zachowanie w momencie przecięcia			Przesunięcie punktu pracy, ograniczenie mocy wyjściowej			
Rozłącznik DC			Tak			
Ochrona przed odwróconą polaryzacją			Tak			

INTERFEJSY	SYMO GEN24 3.0 PLUS	SYMO GEN24 4.0 PLUS	SYMO GEN24 5.0 PLUS	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
WLAN / 2x Ethernet LAN			Fronius Solar.web, Modbus TCP SunSpec, Fronius Solar API (JSON)			
6 cyfrowych wejść/wyjść + 6 cyfrowych wejść			Interfejs do odbiornika zdalnego sterowania, zarządzanie energią			
USB 2.0 (gniazdo typu A)			Zasilanie 1 A			
Zatrzymanie awaryjne (WSD)			Tak			
Rejestrator danych i webserwer			W zestawie			
2x RS485			Modbus RTU SunSpec (third-party supplier) / Fronius Smart Meter, battery, Fronius Ohmpilot			

¹⁾ Funkcja „FULL BACKUP” oznacza pełne zasilanie rezerwowe. Funkcja ta jest dostępna dla Symo GEN24 6.0 - 10.0 Plus. W przypadku opcji Full Backup wymagane są dodatkowe zewnętrzne komponenty do odłączenia domu od sieci AC. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w instrukcji obsługi.

²⁾ Zależy od podłączonego akumulatora

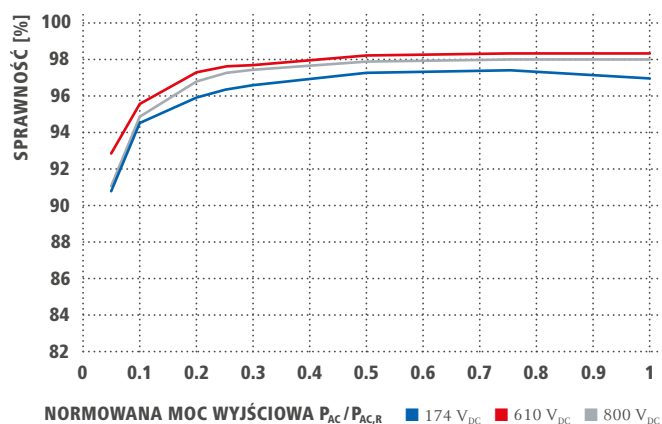
³⁾ Zgodnie z IEC 62109-1. Opcjonalne dodatkowe urządzenie ochrony przeciwprzepięciowej DC SPD typ 1 + 2 dla 2 trackerów MPP, dostępne pod następującym numerem katalogowym: 4240313, CK

⁴⁾ Aktualne certyfikaty znajdują się na stronie: www.fronius.com

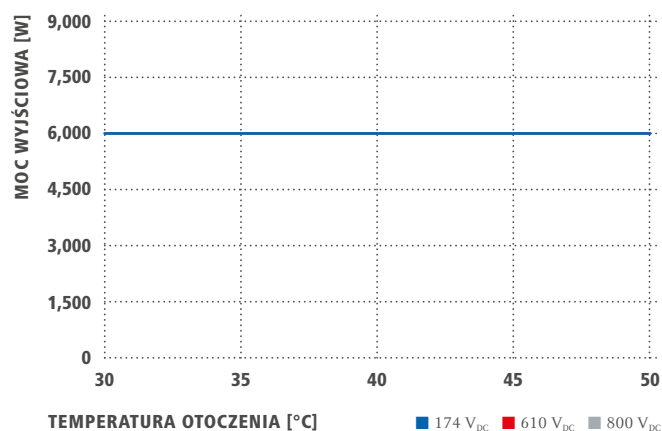
⁵⁾ Z wyjątkiem HVS 12.8 i HVM 8.3

Więcej informacji dostępne na stronie: www.fronius.pl/solar/gen24plus

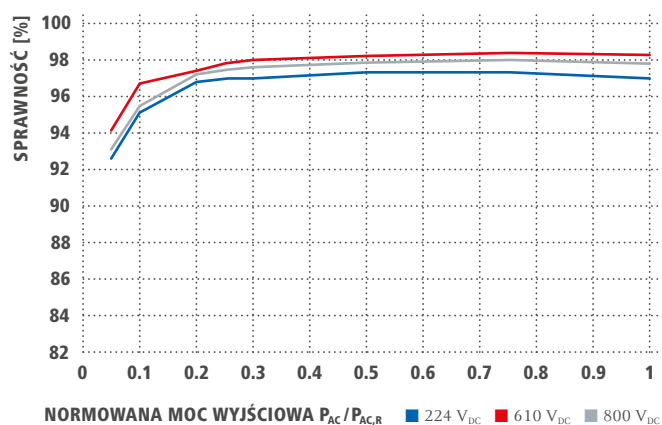
WSPÓŁCZYNNIK SPRAWNOŚCI FRONIUS SYMO GEN24 PLUS 6.0



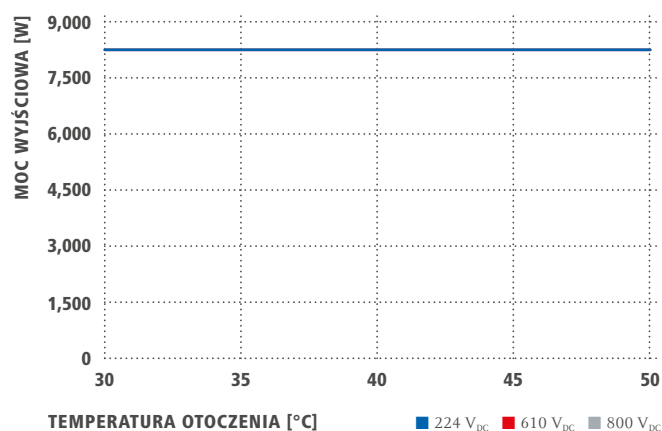
REDUKCJA MOCY WYJŚCIOWEJ W FUNKCJI TEMP. FRONIUS SYMO GEN24 PLUS 6.0



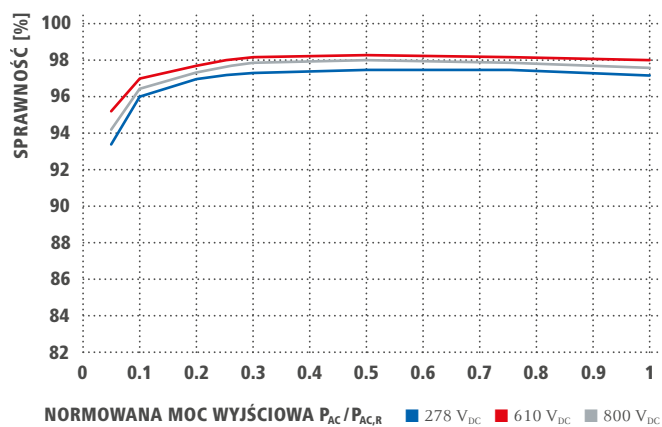
WSPÓŁCZYNNIK SPRAWNOŚCI FRONIUS SYMO GEN24 PLUS 8.0



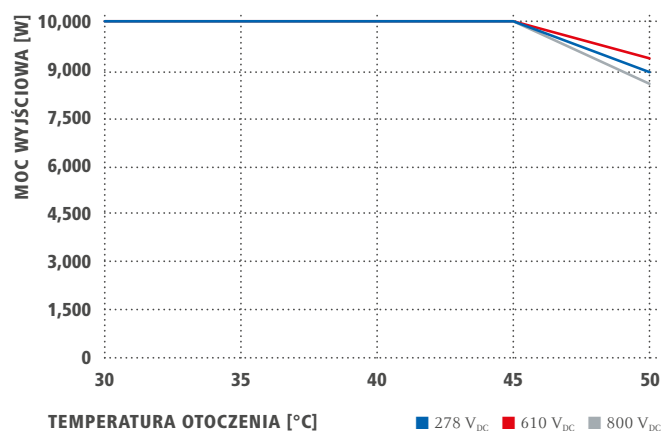
REDUKCJA MOCY WYJŚCIOWEJ W FUNKCJI TEMP. FRONIUS SYMO GEN24 PLUS 8.0



WSPÓŁCZYNNIK SPRAWNOŚCI FRONIUS SYMO GEN24 PLUS 10.0



REDUKCJA MOCY WYJŚCIOWEJ W FUNKCJI TEMP. FRONIUS SYMO GEN24 PLUS 10.0



FRONIUS SYMO GEN24 PLUS

Falownik hybrydowy ze zintegrowaną funkcją zasilania awaryjnego



Komunikacja
Ethernet i WiFi



Dynamic Peak
Manager



Technologia
Multi Flow



SuperFlex
Design



Pełne zasilanie
awaryjne
(en. Full Back-up)



PV Point
podstawowe zasilanie
awaryjne



Wyprodukowano
w Austrii / UE



Fronius SYMO GEN24 Plus o klasach mocy od 6.0 do 10.0 kW jest idealnym falownikiem hybrydowym dla prywatnych gospodarstw domowych. Dzięki różnorodnym funkcjom dostępnym w standardzie, zaspokajają potrzeby każdego klienta.

Falownik GEN24 Plus spełnia wszystkie oczekiwania dzięki licznym opcjom, takim jak funkcje zarządzania energią, połączenie WLAN w standardzie, łączność Ethernet i łatwa integracja komponentów innych firm. W szczególności dzięki różnym opcjom zasilania awaryjnego (PV Point, pełne zasilanie awaryjne) zapewnia najwyższy stopień niezawodności zasilania.

DANE TECHNICZNE FRONIUS SYMO GEN24 PLUS (6.0, 8.0, 10.0)

DANE WEJŚCIOWE	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Liczba trackerów MPP	2		
Maks. prąd wejściowy (I _{dc max} dla MPPT1 / MPPT2)	25 A / 12.5 A		
Maks. prąd zwarcia dla pola modułów (MPPT1/MPPT2)	37.5 A / 18.75 A		
Zakres napięcia wejściowego (U _{dc min} - U _{dc max})	80 V - 1,000 V		
Znamionowe napięcie wejściowe (U _{dc,r})	610 V		
Napięcie rozpoczęcia pracy (U _{dc start})	80 V		
Użyteczny zakres napięć MPP	80 V - 800 V		
Liczba łańcuchów na tracker (MPPT1 / MPPT2)	2 / 1		
Maks. moc generatora PV (P _{dc max})	9 kW _{peak}	12 kW _{peak}	15 kW _{peak}
DANE WYJŚCIOWE	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Moc znamionowa AC (P _{ac,r})	6,000 W	8,000 W	10,000 W
Maks. moc wyjściowa	6,000 VA	8,000 VA	10,000 VA
Maks. prąd na wyjściu (I _{ac max})	16.4 A		
Przyłącze sieciowe (zakres napięcia)	3~NPE 400 V / 230 V or 3~NPE 380 V / 220 V (+20 % / - 30%)		
Częstotliwość (zakres częstotliwości)	50 Hz / 60 Hz (45 Hz - 66 Hz)		
Współczynnik zawartości harmonicznych THD	< 3.5 %		
Współczynnik mocy (cos φ _{ac,r})	0.7 - 1 ind. / poj.		
Zasilanie awaryjne	3~NPE 400 V / 230 V		
DANE TECHNICZNE FUNKCJI PV POINT / FULL BACKUP	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Nominalna moc wyjściowa PV Point / full backup	3,000 VA / 6,000 VA	3,000 VA / 8,000 VA	3,000 VA / 10,000 VA
Nominalna moc na fazę full backup	3.68 kVA		
Przyłącze sieciowe (zakres napięcia) PV Point	1 ~ NPE 220 V / 230 V		
Przyłącze sieciowe (zakres napięcia) full backup	3~NPE 400V/230V oder 3~NPE 380V/220V		
Czas przełączenia	< 90 sekund		
PODŁĄCZENIE AKUMULATORA	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Ilość podłączeń DC	1		
Maks. prąd wejściowy (I _{dc max})	22 A		
Zakres wejściowego napięcia DC (U _{dc min} - U _{dc max})	160 V - 500 V		
Maks. moc wejściowa/wyjściowa ¹⁾	6,220 W	8,260 W	10,300 W
Maks. moc ładowania od strony AC	6,000 W	8,000 W	10,000 W

DANE TECHNICZNE FRONIUS SYMO GEN24 PLUS (6.0, 8.0, 10.0)

DANE OGÓLNE	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Wymiary (wysokość x szerokość x głębokość)	594 x 527 x 180 mm		
Waga (falownik / z opakowaniem)	24 / 28,5 kg		
Stopień ochrony	IP 66		
Klasa ochronności	1		
Utrata energii w nocy	< 10 W		
Kategoria przepięciowa (DC/AC) ²⁾	2 / 3		
Topologia falownika	Beztransformatowy		
Chłodzenie	Regulowana wymuszona wentylacja		
Montaż	Montaż wewnętrzny lub na zewnątrz budynków		
Zakres temperatur otoczenia	-25 - +60 °C		
Dopuszczalna wilgotność powietrza	0 - 100 %		
Maks. wysokość montażu	3,000 m / 4,000 m (nieograniczony / ograniczony zakres napięcia)		
Zaciski przyłączeniowe DC do PV	3x DC+ oraz 3x DC- wtykowe zaciski sprężynowe 2.5 - 10 mm ²		
Zaciski przyłączeniowe DC do akumulatora	1x BATT+ oraz 1x BATT- wtykowe zaciski sprężynowe 2.5 - 10 mm ²		
Zaciski przyłączeniowe AC	5x AC wtykowe zaciski sprężynowe 1.5 - 10 mm ² 3x zasilanie awaryjne wtykowe zaciski sprężynowe 1.5mm ² - 10mm ² 5x PE-zaciski śrubowe 2.5 - 16 mm ²		
Certyfikaty i zgodność z normami	IEC 62109, IEC 62116, IEC 61727, IEC 62909, VDE 0126, VDE AR-N4105, AS/NZS 4777.2, EN 50549, CEI 0-21, G 98, R25 ⁴⁾		
Funkcje zasilania awaryjnego	PV Point lub full backup		
Kompatybilne typy akumulatorów	BYD Battery-Box Premium HVS/HVM ³⁾		

SPRAWNOŚĆ	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Maks. sprawność	98.2 %		
Europejska sprawność ważona (η _{EU})	97.7 %	97.8 %	97.9 %
Sprawność wyszukiwania MPP	> 99.9 %		

ZABEZPIECZENIA	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
Pomiar izolacji DC	Tak		
Zachowanie w momencie przecięcia	Przesunięcie punktu pracy, ograniczenie mocy wyjściowej		
Rozłącznik DC	Tak		
Ochrona przed odwróconą polaryzacją	Tak		

INTERFEJSY	SYMO GEN24 6.0 PLUS	SYMO GEN24 8.0 PLUS	SYMO GEN24 10.0 PLUS
WLAN / 2x Ethernet LAN	Fronius Solar.web, Modbus TCP SunSpec, Fronius Solar API (JSON)		
6 cyfrowych wejść/wyjść + 6 cyfrowych wejść	Interfejs do odbiornika zdalnego sterowania, zarządzanie energią		
USB 2.0 (gniazdo typu A)	Zasilanie 1 A		
Zatrzymanie awaryjne (WSD)	Tak		
Rejestrator danych i webserwer	W zestawie		
2x RS485	Modbus RTU SunSpec (third-party supplier) / Fronius Smart Meter, battery, Fronius Ohmpilot		

¹⁾ Zależy od podłączonego akumulatora ²⁾ Zgodnie z IEC 62109-1 ³⁾ Z wyjątkiem HVS 12.8 and HVM 8.3

⁴⁾ Aktualne certyfikaty znajdują się na stronie: www.fronius.com

Więcej informacji dostępne na stronie www.fronius.pl

/ Perfect Welding / Solar Energy / Perfect Charging

TRZY JEDNOSTKI BIZNESOWE, JEDNA PASJA. TECHNOLOGIA, KTÓRA USTANAWIA STANDARDY.

To co w roku 1945 rozpoczęło się jako jednoosobowa działalność, jest dzisiaj przedsiębiorstwem, które ustanawia nowe standardy technologiczne w dziedzinach spawalnictwa, fotowoltaiki i ładowania akumulatorów. Na całym świecie zatrudniamy blisko 5440 pracowników, a o naszej innowacyjności niech świadczy to, że jesteśmy w posiadaniu 1264 patentów. Zrównoważony rozwój oznacza dla nas, że kwestie ochrony środowiska i sprawy socjalne traktujemy na równi z wskaźnikami ekonomicznymi. Nasza dewiza jest od zawsze ta sama: chcemy być liderem innowacyjności.

Dalsze informacje na temat wszystkich produktów firmy Fronius oraz naszych partnerów handlowych i przedstawicieli można uzyskać na stronie internetowej www.fronius.pl



Zapraszamy na:

**Forum
Instalatorów
Falowników
Fronius**

www.forum-fronius.pl

MADE IN  **AUSTRIA**
208

Fronius Polska Sp. z o.o.
ul. Gustawa Eiffel'a 8
44-109 Gliwice, Polska
Tel +48 32 621 07 00
Fax +48 32 621 07 01
pv-sales-poland@fronius.com
www.fronius.pl/solar

Tekst i rysunki zgodne ze stanem technicznym w czasie przekazywania do druku. Zmiany zastrzeżone.
Wszystkie dane pomimo starannego opracowania są bez gwarancji i są wyłączone od odpowiedzialności. Prawo autorskie © 2011 Fronius™. Wszelkie prawa zastrzeżone.

M2,00,0008, PL-v07 Maj 2020