



**Politechnika Wroclawska**

**Wydział Inżynierii Środowiska**

Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza

**Badania wpływu zielonych ścian  
w klimacie umiarkowanym  
na zjawisko transportu ciepła  
i wartości wybranych wskaźników  
komfortu cieplnego**

**mgr inż. Małgorzata Małyszko**

PRACA DOKTORSKA

Promotor: prof. dr hab. inż. Jan Danielewicz

Promotor pomocniczy: dr inż. Marta Laska

Słowa kluczowe: zielone ściany,  
zielone fasady,  
żyjące ściany,  
komfort termiczny,  
wymiana ciepła,  
temperatura promieniowania.

WROCLAW 2023

*W tym miejscu chciałabym serdecznie podziękować wszystkim osobom, które pomagały i wspierały mnie podczas realizacji niniejszej pracy.*

*W szczególności podziękowania kieruję do promotorów prof. dr hab. inż. Jana Danielewicza oraz dr inż. Marty Laski, za cenne rady oraz wskazówki podczas pisania pracy, za wskazania kierunków rozwoju, jak i zarażenie pasją do nauki.*

*Dziękuję także moim najbliższym, mężowi, mamie, rodzinie i przyjaciołom, których wsparcie było nieocenione.*

*Podziękowania należą się także dr Michałowi Karpukowi oraz dr inż. Sylwii Szczęśniak oraz innym kolegom, koleżankom i pracownikom Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej.*

## Streszczenie

Działania władz samorządowych, a także na szczeblu międzynarodowym wskazują aktualne kierunki przedsięwzięć dążących do obniżania energochłonności budynków, redukcji miejskich wysp ciepła oraz utrzymywania komfortowych warunków w budynkach mieszkalnych. Rozwiązaniami stosowanymi w celu ich realizacji są m.in. zwiększanie obszarów biologicznie czynnych oraz izolacja ścian zewnętrznych. W ramach rewitalizacji budynków i poprawy jakości życia mieszkańców miast, wykonuje się ściany pokryte roślinnością. Mają one duży potencjał wykorzystania, w szczególności w obszarach istniejącej gęstej tkanki miejskiej.

W rozprawie doktorskiej podjęto tematykę związaną z oddziaływaniem warstwy roślinności na ścianach na zjawisko transportu ciepła i energochłonność budynku w okresie zimnym w klimacie polskim. W ramach pracy analizie poddano również rolę zielonych ścian w kontekście wpływu na wybrane wskaźniki komfortu termicznego.

Przeprowadzone badania literaturowe wykazały korzyści i ograniczenia płynące z zastosowania zielonych ścian na obiektach. Ponadto wskazano kierunki działań krajów i miast europejskich w celu przeciwdziałania negatywnym skutkom zmiany klimatu oraz obniżenia popytu na energię przez budynek za pośrednictwem stosowanej roślinności na przegrodach.

Wykonano stanowiska pomiarowe w dwóch obiektach mieszkalnych we Wrocławiu, z warstwą roślinności na ścianach i bez niej, w których zrealizowano badania doświadczalne obejmujące okres zimny (105 dni pomiarowych między 01.10.2021 a 14.01.2022). Przeanalizowano zarejestrowane parametry i na ich podstawie określono wpływ roślinności na temperaturę w otoczeniu zielonej fasady budynku w okresie zimnym. Za pośrednictwem obserwacji i uzyskanych danych meteorologicznych z okresu objętego badaniami oraz modelu scharakteryzowanego w literaturze przez Irinę Susorową i in. opisującego efekty cieplne zielonej ściany, opracowano model statystyczny transportu ciepła przez przegrodę pionową z roślinnością zlokalizowaną w klimacie polskim w okresie zimnym. Z uwagi na złożoność modelu w celu wykorzystania go w innych warunkach niż przebadane konieczna jest jego wcześniejsza weryfikacja na danych pomiarowych. Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz statystycznych wykazano, że warstwa roślinności powoduje lokalny wzrost temperatury w obszarze między nią a ścianą, dzięki czemu straty ciepła z budynku w okresie zimnym zostają ograniczane.

W programie *WUFI Plus* opracowanym przez Instytut Fraunhofera bazującym na modelu ciepłno-wilgotnościowym Künzela zrealizowano modelowanie energetyczne oraz warunków komfortu termicznego dla wybranej strefy budynku (jedno pomieszczenie). Zaimplementowano do niego model 3D bryły budynku wykonanego w programie *SketchUp*. Wykazano, że zimozielona warstwa roślinności wpływać może na oszczędność energii w symulowanej strefie w okresie zimnym. Redukcja zapotrzebowania na energię dla wybranego pomieszczenia budynku zlokalizowanego w klimacie polskim dla 105dni w przypadku braku izolacji ścian zewnętrznych wyniosła 12%. Przypuszcza się, że w okresie letnim redukcja energii zużywanej na cele chłodzenia może być jeszcze większa niż w miesiącach chłodnych. Powyższy wynik wskazuje na stosowność implementacji zielonych ścian w niezaizolowanych budynkach istniejących.

Opracowanie zawiera także wyniki wykonanych obliczeń i symulacji dotyczących wpływu roślinności na warunki komfortu cieplnego w pomieszczeniach. Poddano analizie wyznaczone wskaźniki *PMV*, *PPD*, a także temperatury operatywne oraz średnie temperatury promieniowania przegród. Na ich podstawie wykazano, że zielone ściany mogą przyczynić się do poprawy komfortu termicznego w pomieszczeniach, a także pozytywnie wpłynąć na jakość życia mieszkańców miast.

## Abstract

The actions of local and international authorities indicate the current directions of undertakings aimed at lowering the energy consumption of buildings, reducing urban heat islands, and maintaining comfortable conditions in residential buildings. Solutions used to achieve them are, for e.g. increasing biologically active areas and insulating exterior walls. One of the possible solutions of green walls is made as part of the revitalisation of buildings and the improvement of the quality of life standard for urban residents. They have a high potential for use, in particular in areas of existing dense urban infrastructure.

The dissertation addressed the impact of the vegetation layer on walls on the phenomenon of heat transport and energy consumption of a building during the cold season in the Polish climate. The work also analyses the role of green walls in the context of their impact on selected indicators of thermal comfort.

Literature studies have shown the benefits and limitations of using green walls on existing buildings. Found and identified the directions of European countries and cities to address the negative effects of climate change and reduce the energy demand of the building through the applied vegetation on the walls.

The experiments were made in two residential buildings, with and without a layer of vegetation on the walls. The experimental research was carried out during the cold period (105 measurement days between 01.10.2021 and 14.01.2022) in Wrocław. Based on the recorded and analysed parameters, the effect of vegetation on the ambient temperature of the green walls during the cold period was determined. Through observations, obtained meteorological data from the study period, and the model characterised in the literature by Irina Susorova et al. describing the thermal effects of a green wall, a statistical model of heat transport through vegetated facade located in the Polish climate during the cold season was developed. Due to the high level of complexity of the model, in order to use it in conditions other than those studies, it is necessary to verify it on measured data. Following the research and statistical analysis, it was shown that the green walls cause a local temperature increase in the area of the wall and thus, the heat loss from the building during the cold season is reduced.

In the WUFI Plus software developed by the Fraunhofer Institute based on the Künzler hydrothermal model, energy and thermal comfort conditions for a selected building zone (one room) were modelled. A 3D model of the building was made in *SketchUp* software and implemented into *WUFI Plus*. The outcome of the simulation shown that the evergreen

vegetation layer can influence energy savings in the simulated zone during the cold season. The reduction in energy demand for a selected room in a non-insulated building located in a Polish climate for 105 days achieved 12%. It is thought that the reduction of energy in the summer needed for cooling may be more significant than in the cold months. The results mentioned indicate the suitability of implementing green walls in existing uninsulated buildings.

The study also includes the results of calculations and simulations performed on the effect of vegetation on indoor thermal comfort conditions. The determined *PMV*, *PPD*, operative temperatures and average radiant temperatures of the walls were analysed. Green walls were shown to contribute to the improvement of indoor thermal comfort, as well as having a positive impact on the quality of life of urban residents.

## Spis treści

Wykaz stosowanych oznaczeń i akronimów .....	9
1. Wstęp.....	15
2. Dotychczasowy stan badań .....	16
3. Teza, cele i zakres pracy.....	17
4. Zielone ściany .....	18
4.1. Klasyfikacja zielonych ścian .....	19
Zielone fasady .....	21
Żyjące ściany.....	22
Popularne zielone ściany [36] .....	22
4.2. Zalety i ograniczenia zielonych ścian.....	24
4.3. Zielone ściany a polityka miast .....	29
5. Materiały budowlane i izolacyjne wykorzystywane w budynkach.....	33
5.1. Najpopularniejsze materiały stosowane do dociepleń i ich właściwości .....	35
5.2. Wymagania dotyczące współczynnika przenikania ciepła dla ścian zewnętrznych w Polsce.....	38
6. Komfort cieplny .....	39
7. Wpływ roślinności na aspekty życia człowieka .....	48
7.1. Wpływ roślinności na jakość powietrza .....	49
7.2. Wpływ zielonych ścian na komfort człowieka.....	50
8. Wymiana ciepła i masy w przegrodzie.....	53
8.1. Model termiczny .....	54
8.2. Model termiczno-wilgotnościowy .....	64
Model sprzężonego transportu ciepła i wilgoci przez zieloną fasadę .....	64
Model hydrotermiczny żyjącej ściany.....	65
Model cieplno-wilgotnościowy zawarty w programie WUFI Plus.....	66
9. Badania doświadczalne .....	69

9.1.	Opis i charakterystyka stanowiska .....	69
9.2.	Stanowiska pomiarowe .....	70
9.3.	Sprzęt pomiarowy .....	73
	Temperatura i wilgotność powietrza .....	73
	Temperatura powierzchni przegrody .....	73
	Mikroklimat pomieszczenia .....	74
10.	Analiza zmierzonych i wyznaczonych parametrów .....	76
10.1.	Temperatura w otoczeniu roślinności oraz powierzchni ścian zewnętrznych .....	77
10.2.	Wilgotność względna w pomieszczeniu, zawartość wilgoci w powietrzu wewnętrznym a temperatura powierzchni przegrody .....	80
10.3.	Temperatura promieniowania przegród .....	82
11.	Modelowanie statystyczne transportu ciepła przez przegrody z roślinnością .....	86
11.1.	Dane wejściowe i założenia .....	87
	Parametry powietrza zewnętrznego i gruntu .....	87
	Parametry dotyczące roślinności .....	88
	Parametry w warstwie między roślinnością a przegrodą budynku .....	92
	Parametry ścian zewnętrznych .....	92
	Parametry powietrza w pomieszczeniu .....	95
11.2.	Badania statystyczne poszczególnych zmiennych równania .....	95
11.3.	Modyfikacja istniejącego modelu matematycznego .....	97
	Weryfikacja istniejącego modelu opisanego w literaturze w odniesieniu do zebranych danych .....	98
	Statystyczne opracowanie danych .....	99
	Modyfikacje istniejącego modelu - model statystyczny .....	102
	Weryfikacja zmodyfikowanego modelu .....	111
	Przedstawienie modelu końcowego .....	112
11.4.	Ciepło i jego transport do powierzchni zewnętrznej przegrody .....	116
12.	Modelowanie warunków w WUFI Plus .....	118



12.1.	Założenia do obliczeń .....	118
12.2.	Wyniki symulacji .....	121
13.	Wyznaczenie i analiza wskaźników komfortu cieplnego.....	126
13.1.	Mikroklimat w pomieszczeniu.....	126
13.2.	Analityczne wyznaczenie wskaźników komfortu cieplnego .....	130
13.3.	Badania ankietowe .....	134
	Projekt ankiety.....	135
	Rzeczywiste odczucia i preferencje cieplne respondentów .....	135
14.	Podsumowanie i wnioski końcowe .....	137
15.	Bibliografia.....	141
16.	Spis rysunków .....	154
17.	Spis wykresów.....	155
18.	Spis tabel .....	158
19.	Spis zdjęć.....	160

## Wykaz stosowanych oznaczeń i akronimów

### Oznaczenia łacińskie (tłumaczenie własne):

- $A$  - ważony współczynnik pochłaniania dźwięku, -
- $C$  - ilość ciepła wymienianego na drodze konwekcji,
- $C_{bw}$  - wymiana ciepła między powietrzem zewnętrznym a ścianą bez roślinności,  $W/m^2$ ,
- $c_p$  - ciepło właściwe,
- $c_{p\text{air}}$  - ciepło właściwe powietrza przy danym ciśnieniu,  $J/mol \cdot ^\circ C$ ,
- $c_{pca}$  - ciepło właściwe powietrza w warstwie roślinności,
- $c_{pwall}$  - ciepło właściwe materiału, z którego wykonano przegrodę,  $J/kg \cdot K$ ,
- $C_{res}$  - ilość ciepła wymienianego podczas oddychania na drodze konwekcji,  $W/m^2$ ,
- $C_{vw}$  - wymiana ciepła między powietrzem zewnętrznym a ścianą z roślinnością,  $W/m^2$ ,
- $D$  - grubość warstwy roślinnej, m,
- $D_{leaf}$  - średnia grubość liścia, m,
- $d_0$  - wysokość parteru, m,
- $D_\phi$  - współczynnik przewodzenia kapilarnego,  $m^2/s$ ,
- $E$  - ilość ciepła wymienianego na drodze odparowania potu z ciała (entalpia),  $W/m^2$ ,
- $e_a$  - parcjalne ciśnienie pary wodnej, kPa,
- $E_{res}$  - ilość ciepła wymienianego podczas oddychania na drodze parowania,  $W/m^2$ ,
- $e_s$  - ciśnienie pary wodnej nasyconej w zależności od temperatury, kPa,
- $E_w$  - ewapotranspiracja,
- $F$  - współczynnik pomiędzy obiektami i źródłami promieniowania długofalowego, -
- $f_{cl}$  - współczynnik powierzchni odzieży,
- $F_{gr}$  - współczynnik pomiędzy obiektami i źródłami promieniowania długofalowego ściana-grunt, -
- $F_{sky}$  - współczynnik pomiędzy obiektami i źródłami promieniowania długofalowego ściana-niebo, -
- $g$  - przewodnictwo molowe,  $mol/m^2 \cdot s$ ,
- $g_{asll}$  - rzeczywista przewodność molowa aparatów szparkowych dolnej części liścia,  $mol/m^2 \cdot s$ ,
- $g_{asul}$  - rzeczywista przewodność molowa aparatów szparkowych górnej części liścia,  $mol/m^2 \cdot s$ ,
- $g_{bh}$  - przewodność molowa warstwy granicznej dla wymiany ciepła w powietrzu,  $mol/m^2 \cdot s$ ,

- $g_{bv}$  - przewodności molowa warstwy granicznej dla wymiany ciepła dla pary wodnej, mol/m<sup>2</sup>·s,
- $g_c$  - przewodność molowa powietrza, mol/m<sup>2</sup>·s,
- $g_v$  - przewodności molowa pary wodnej w powietrzu, mol/m<sup>2</sup>·s,
- $H$  - entalpia wilgotnego materiału, J/m<sup>3</sup>,
- $h_{bw}$  - współczynnik konwekcyjnego przenikania ciepła powierzchni przegrody bez roślinności, W/m<sup>2</sup>·K,
- $h_c$  - współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję ciepła, W/m<sup>2</sup>·K,
- $h_r$  - współczynnik wymiany ciepła przez promieniowanie, °C,
- $h_v$  - utajone ciepło parowania, J/kg,
- $h_{vw}$  - współczynnik konwekcyjnego przenikania ciepła powierzchni przegrody z roślinnością, W/m<sup>2</sup>·K,
- $I_{cl}$  - izolacyjność cieplna odzieży, m<sup>2</sup>·K/W,
- $I_{max}$  - maksymalne natężenie promieniowania słonecznego padające na fasadę budynku, W/m<sup>2</sup>,
- $I_t$  - całkowite natężenie promieniowania słonecznego padające na fasadę budynku, W/m<sup>2</sup>,
- $K$  - ilość ciepła wymienianego na drodze przewodzenia, W/m<sup>2</sup>,
- $K_{ar}$  - stała von Karmana, -,
- $L$  - grubość przegrody, m,
- $LR_{bw}$  - promieniowanie długofalowe docierające do ściany bez roślinności, W/m<sup>2</sup>,
- $LR_e$  - promieniowanie długofalowe emitowane/odbite przez roślinność, W/m<sup>2</sup>,
- $LR_{vw}$  - promieniowanie długofalowe docierające do ściany z roślinnością, W/m<sup>2</sup>,
- $LR_{vwn}$  - promieniowanie długofalowe docierające do ściany z roślinnością netto, W/m<sup>2</sup>,
- $M$  - tempo metabolizmu, W/m<sup>2</sup>,
- $p$  - ciśnienie wilgotnego powietrza, Pa
- $P_{air}$  - ciśnienie atmosferyczne, kPa,
- $p_a$  - ciśnienie cząstkowe pary wodnej, Pa,
- $p_{gs}$  - ciśnienie pary nasyconej powietrza
- $p_{sat}$  - ciśnienie cząstkowe pary wodnej, Pa,
- $p_{v,ca}$  - ciśnienie cząstkowe pary wodnej roślinności, Pa,
- $R$  - ilość ciepła wymienianego na drodze promieniowania, W/m<sup>2</sup>,
- $r_a$  - opór aerodynamiczny, s/m,
- $r_{as}$  - rzeczywisty opór szparkowy liścia, m<sup>2</sup>·s/mol,

- $R$  - współczynnik korelacji, -,  
 $R^2$  - współczynnik determinacji, -,  
 $R_{bw}$  - opór cieplny przegrody zewnętrznej bez roślinności,  $m^2 \cdot K/W$ ,  
 $RH$  - wilgotność względna, %,  
 $RH_{air}$  - wilgotność względna powietrza zewnętrznego, %,  
 $RH_{inbw}$  - wilgotność względna powietrza w pomieszczeniu budynku bez roślinności, %,  
 $RH_{invw}$  - wilgotność względna powietrza w pomieszczeniu budynku z roślinnością, %,  
 $R_n$  - bilans promieniowania netto  
 $R_{plant}$  - oporność termiczna warstwy roślinnej,  $m^2 \cdot K/W$ ,  
 $r_s$  - typowy opór szparkowy liścia,  $m^2 \cdot s/mol$ ,  
 $R_w$  - ważony wskaźnik redukcji hałasu, dB,  
 $R_{vw}$  - opór cieplny przegrody zewnętrznej z roślinnością,  $m^2 \cdot K/W$ ,  
 $S$  - akumulacja ciepła w skórze i w organizmie,  $W/m^2$ ,  
 $S_{bw}$  - energia cieplna akumulowana w przegrodzie bez roślinności,  $W/m^2$ ,  
 $S_{vw}$  - energia cieplna akumulowana w przegrodzie z roślinnością,  $W/m^2$ ,  
 $SR_{bw}$  - słoneczne promieniowanie krótkofalowe docierające do ściany bez roślinności,  $W/m^2$ ,  
 $SR_{vw}$  - słoneczne promieniowanie krótkofalowe docierające do ściany z roślinnością,  $W/m^2$ ,  
 $t$  - czas, sek,  
 $T$  - temperatura, °C,  
 $T_a$  - temperatura powietrza, °C,  
 $T_{air}$  - temperatura powietrza zewnętrznego, °C,  
 $T_{ca}$  - temperatura powietrza w warstwie roślinnej, °C,  
 $T_{cl}$  - temperatura powierzchni odzieży, °C,  
 $T_{comf}$  - temperatura komfortu, °C,  
 $T_{dewpoint}$  - temperatura punktu rosy, °C,  
 $T_{gr}$  - temperatura gruntu, °C,  
 $T_{in}$  - temperatura powietrza w pomieszczeniu, °C,  
 $T_{inbw}$  - temperatura powietrza w pomieszczeniu budynku bez roślinności, °C,  
 $T_{invw}$  - temperatura powietrza w pomieszczeniu budynku z roślinnością, °C,  
 $T_{leaf}$  - temperatura powierzchni liścia, °C,  
 $T_{op}$  - temperatura operatywna, °C,  
 $T_p$  - temperatura liści, °C,  
 $T_{pin}$  - temperatura wewnętrznej powierzchni ściany bez roślinności, °C,

- $T_{pout}$  - temperatura zewnętrznej powierzchni ściany bez roślinności, °C,  
 $T_{pvw}$  - temperatura zewnętrznej powierzchni ściany za roślinnością, °C,  
 $T_r$  - średnia temperatura promieniowania, °C,  
 $T_{rbw}$  - średnia temperatura promieniowania w pomieszczeniu budynku bez roślinności, °C,  
 $T_{rvw}$  - średnia temperatura promieniowania w pomieszczeniu budynku z roślinnością, °C,  
 $T_{rm}$  - średnia temperatura dążąca, °C,  
 $T_{sbw}$  - temperatura powierzchni przegrody bez roślinności, °C,  
 $T_{sky}$  - temperatura czystego nieba, °C,  
 $T_{svw}$  - temperatura powierzchni przegrody za warstwą roślinności, °C,  
 $U$  - współczynnik przenikania ciepła, W/m<sup>2</sup>·K,  
 $Q_{bw}$  - strumień ciepła transportowany przez ścianę bez roślinności, W/m<sup>2</sup>,  
 $Q_{leaf}$  - promieniowanie pochłonięte przez zieloną ścianę, W/m<sup>2</sup>,  
 $Q_{vw}$  - strumień ciepła transportowany przez ścianę z roślinnością, W/m<sup>2</sup>,  
 $v_{air}$  - prędkość powietrza, m/s,  
 $W$  - wykonana sparametryzowana praca zewnętrzna, W/m<sup>2</sup>,  
 $X$  - zawartość wilgoci, m<sup>3</sup>/ m<sup>3</sup>,  
 $XR$  - wymiana promieniowania między warstwą roślinną a powierzchnią ściany zewnętrznej, W/m<sup>2</sup>,  
 $z_m$  - wysokość odniesienia dla pomiarów wiatru, m,  
 $z_0$  - wysokość nierówności, m,

**Oznaczenia greckie (tłumaczenie własne):**

- $\alpha_{leaf}$  - współczynnik absorpcji promieniowania przez liście, -  
 $\alpha_{wall}$  - wskaźnik absorpcji energii przez nieosłoniętą ścianę, -  
 $\Delta$  - nachylenie funkcji ciśnienia pary nasyconej, kPa/°C,  
 $\nabla$  - symbol matematyczny, konwencja notacyjna,  
 $\delta_p$  - współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu, kg/(m·s·Pa),  
 $\gamma$  - stała termodynamiczna, 1/°C,  
 $\gamma'$  - pozorna stała termodynamiczna, 1/°C,  
 $\varepsilon$  - współczynnik emisyjności, -  
 $\varepsilon_{gr}$  - współczynnik emisyjności dla gruntu, -  
 $\varepsilon_{leaf}$  - współczynnik emisyjności dla warstwy roślin, -  
 $\varepsilon_{sky}$  - współczynnik emisyjności dla niebosłonu, -

- $\varepsilon_{wall}$  - współczynnik emisyjności dla przegrody, -  
 $\theta$  - kąt nachylenia powierzchni przegrody,  
 $\kappa$  - współczynnik tłumienia promieniowania przez roślinność  
 $\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m·K),  
 $\tau$  - przepuszczalność promieniowania przez warstwę roślin,  
 $\rho$  - gęstość materiału, z którego wykonano przegrodę, kg/m<sup>3</sup>,  
 $\rho_{air}$  - gęstość powietrza zewnętrznego, kg/m<sup>3</sup>,  
 $\rho_{ca}$  - gęstość masy powietrza w warstwie roślinnej,  
 $\sigma$  - stała Stefana-Boltzmann, -

**Indeksy górne i dolne wykorzystane we wzorach (41)÷(43) (tłumaczenie własne):**

- $a$  - otoczenie zewnętrzne,  
 $ca$  - warstwa roślinna (czasza),  
 $conv$  - konwekcja,  
 $gro$  - grunt,  
 $p$  - roślinność,  
 $rl$  - promieniowanie długofalowe,  
 $rs$  - promieniowanie krótkofalowe,  
 $sky$  - nieboskłon,  
 $sw$  - powierzchnia zewnętrzna ściany,  
 $trans$  - transpiracja,  
 $v$  - transport masy,

**Opisy wyrażeń wykorzystane w równaniach (49)÷(50) (tłumaczenie własne):**

- $\frac{dH}{dT}$  - zdolność magazynowania ciepła przez wilgotny materiał budowlany, J/m<sup>3</sup>·K,  
 $\frac{dX}{dRH}$  - zdolność magazynowania wilgoci przez materiał budowlany, kg/ m<sup>3</sup>,

**Akronimy (tłumaczenie własne):**

- $BMI$  - indeks masy ciała, stosunek wagi do wzrostu,  
 $BREEAM$  - Building Research Establishment Environmental Assessment Method,  
 $DGNB$  - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen,  
 $HQE$  - Haute Qualité Environmentale,

<i>IAQ</i>	- Indoor Air Quality, jakość powietrza wewnętrznego
<i>LAI</i>	- Leaf Area Index, wskaźnik pokrycia liściowego, indeks liściowy
<i>LEED</i>	- Leadership in Energy and Environmental Design,
<i>UFP</i>	- ultra małe cząstki
<i>UHI</i>	- Urban Heat Island, miejska wyspa ciepła,
<i>PCV</i>	- polichlorek winylu,
<i>PM</i>	- małe cząstki
<i>PMV</i>	- Predicted Mean Vote, Przewidywana Średnia Ocena,
<i>PPD</i>	-Predicted Percentage Dissatisfied, Przewidywany Odsetek Osób Niezadowolonych, %,
<i>TPV</i>	- Thermal Preference Vote, Skala Preferencji Ciepłych
<i>TSV</i>	- Thermal Sensation Vote, Skala Odczuć Ciepłych,

## 1. Wstęp

Budownictwo w Polsce, jak i na całym świecie to ważny sektor gospodarki energetycznej. W Europie najwięcej, bo ponad 75% powierzchni obiektów zajmują powierzchnie mieszkalne [1]. Natomiast według komunikatu Komisji Europejskiej [2], około 85 - 95% ogółu istniejących budynków nadal będzie użytkowanych przez kolejne 27 lat. Część z nich już teraz wymaga remontów w celu zmniejszenia zużycia energii niezbędnej do utrzymania komfortu termicznego użytkowników. Szczególnym wyzwaniem są budynki zlokalizowane w gęstej tkance miejskiej oraz objęte ochroną konserwatorską.

Odpowiedzią na potrzeby związane z obniżeniem energochłonności budynku, przy jednoczesnym zwiększeniu jakości życia mieszkańców, może być zazielenianie elewacji. Badania [3–9] wskazują, że zarówno ściany, jak i dachy pokryte roślinnością mogą pozytywnie wpłynąć na izolacyjność budynków, w szczególności tych, których termomodernizacja nie została wykonana. Dodatkowym ich atutem jest zwiększanie obszarów biologicznie czynnych w miastach. Jest to korzystne rozwiązanie, także w zawiązku z retencją wód opadowych oraz ograniczaniu występowania miejskiej wyspy ciepła. Co za tym idzie, zarówno polityka miast, krajów, czy m.in. Unii Europejskiej ukierunkowana jest na działania zrównoważone, a ich organy zalecają stosowanie rozwiązań uwzględniających zielone ściany i dachy na budynkach.

Wpływ roślinności porastającej ściany na energochłonność obiektów określana jest poprzez transport ciepła z i do budynku. W tym celu niezbędne jest wykorzystanie modeli matematycznych do opisu tego zjawiska. Istnieje wiele schematów [10–16], które pozwalają wyznaczyć ilość ciepła transportowanego przez ścianę, zarówno z roślinnością, jak i bez. Weryfikację modeli wykonywano na podstawie danych zgromadzonych w różnych strefach klimatycznych, lecz żaden z odnalezionych nie został sprawdzony w klimacie Polski.

Na potrzeby niniejszej pracy przeprowadzono długoterminowe badania doświadczalne w budynkach z roślinnością na ścianach zewnętrznych oraz bez niej. Na ich podstawie zmodyfikowano scharakteryzowany w literaturze [13] model matematyczny opisujący transport ciepła przez przegrodę z zieloną fasadą do warunków klimatu umiarkowanego ciepłego typu przejściowego w okresie zimnym. Przeprowadzono także symulacje w dedykowanym oprogramowaniu *WUFI Plus*, na podstawie których wskazano wpływ zielonych ścian na obniżenie energochłonności przykładowego budynku. Analizy, które przeprowadzono na podstawie badań doświadczalnych oraz symulacji, objęły także wybrane wskaźniki komfortu termicznego. Na ich podstawie wskazano stopień zmienności komfortu



termicznego w pomieszczeniach w przypadku warstwy roślinności na przegrodach budynku oraz bez niej. Obserwacje, analizy oraz ich wyniki zostały zestawione w niniejszej pracy.

## 2. Dotychczasowy stan badań

Badania zielonych ścian w tematyce obniżenia energochłonności budynków oraz ich wpływu na transport ciepła z i do budynku prowadzone są już od lat 80 - tych XIX wieku. Pionierem w tym zakresie jest Azja. Pomiary i analizy wykonywane były także w krajach Ameryki Północnej, jak i w Europie, rzadziej na kontynencie Afrykańskim oraz Południowej Ameryce.

Pierwsze eksperymenty z udziałem roślinności zlokalizowanej w przestrzeniach miejskich polegały na sprawdzeniu wpływu zielonych ścian na efekt chłodzenia [17]. Już wtedy wykazano oddziaływanie roślin na redukcję temperatury w ich sąsiedztwie oraz za warstwą zieleni. Kolejne badania [18–22] utwierdziły naukowców, że zarówno zielone ściany, jak i zielone dachy mogą mieć pozytywny wpływ na obniżenie energochłonności budynku, a także na mikroklimat otoczenia. Z uwagi na różnice związane z parametrami powietrza zewnętrznego, wartości dla obiektów zlokalizowanych w różnych lokalizacjach mogą się różnić.

Równoległe z eksperymentami prowadzono także symulacje dotyczące oddziaływania zielonych ścian m.in. na temperaturę otoczenia, temperaturę przegrody, hałas, czy prędkość wiatru w ich pobliżu, a także na zużycie energii w obiekcie [23–25]. W tym celu wykorzystywano oprogramowania takie jak np. *EDSL Tas*, *Energy Plus*, *WUFI*, *TRNSYS*. Większość wyników obrazujących zastosowanie roślinności na przegrodach wykazała pozytywny jej wpływ na powyższe parametry.

W literaturze [10–16] odnaleźć można modele opisujące transport ciepła przez ściany z roślinnością, które bazują na wielu parametrach związanych m.in. z promieniowaniem krótkofalowym, długofalowym, ewapotranspiracją, konwekcją, przenikaniem oraz przewodzeniem ciepła, a także na wskaźniku pokrycia liściowego *LAI* (stosunek powierzchni liści do powierzchni gruntu). Należy jednak podkreślić, że weryfikację modeli opisywanych w literaturze wykonano, bazując na danych uzyskiwanych z eksperymentów prowadzonych w warunkach innych niż polskie. W literaturze nie odnaleziono modelu transportu ciepła przez przegrodę z roślinnością zlokalizowaną w klimacie umiarkowanym ciepłym typu przejściowego.

W ostatnich latach zauważono wzrost zainteresowania tematyką zielonych ścian. Wskazuje na to tym liczba opublikowanych artykułów w czasopismach naukowych dotyczących roślinności pokrywającej ściany (wzrost liczby publikacji uwzględniających frazę kluczową „green walls” o 140% w latach 2019 - 2022 [26]) oraz regulacji prawnych uwzględniających zalecenia dotyczące terenów biologicznie czynnych. Zainteresowanie powyższym tematem związane jest z wieloma korzyściami, które można osiągnąć dzięki wykorzystaniu zieleni na przegrodach, w szczególności na terenach miejskich i obiektach istniejących.

### **3. Teza, cele i zakres pracy**

Na podstawie wniosków z przeprowadzonych analiz źródeł literaturowych wykazano wpływ roślinności na przegrodach na przepływ ciepła przez przegrodę budynku. Dla tego warunku sformułowano tezę badawczą:

„Możliwa jest modyfikacja istniejącego modelu matematycznego opisującego proces wymiany ciepła przez przegrodę z warstwą roślinności dla ściany zlokalizowanej w klimacie umiarkowanym ciepłym typu przejściowego dla okresu zimowego.”

Celem niniejszej pracy jest sformułowanie modelu bazującego na danych doświadczalnych opisującego transport ciepła przez przegrodę z warstwą roślinności dla warunków klimatu umiarkowanego ciepłego typu przejściowego w okresie zimnym na bazie istniejącego, opisanego w literaturze [13] modelu wymiany ciepła. Wyznaczono także cele towarzyszące, które stanowią:

- określenie wpływu zielonej ściany na energochłonność budynku w okresie zimnym,
- wyznaczenie oraz porównanie wielkości wybranych wskaźników komfortu termicznego dla budynków z roślinnością na ścianach i bez niej,
- sprawdzenie wpływu roślinności na temperaturę w otoczeniu zielonej fasady budynku w okresie zimnym.

Powyższe cele zrealizowano na podstawie przeglądu aktualnego stanu wiedzy, wyników badań doświadczalnych, wykonanych obliczeń, symulacji oraz ich analiz.

Badania wstępne pracy objęły studia literaturowe w tematyce zielonych ścian i komfortu termicznego. Dotyczą klasyfikacji roślinności implementowanej na przegrodach pionowych, a także pozytywnych oraz negatywnych aspektów ich zastosowania. Przeanalizowane publikacje naukowe uwzględniają modele opisujące transport ciepła, a także wymianę ciepła oraz masy przez ściany pokryte roślinnością.

Wykonano stanowisko pomiarowe, które posłużyło przeprowadzeniu badań doświadczalnych. Pomiary zrealizowano w dwóch istniejących budynkach mieszkalnych, których ściany zewnętrzne wykonane zostały z cegły pełnej 12 cm oraz 24 cm, a między nimi znajduje się 12 - sto centymetrowa pustka powietrzna. Ściany zewnętrzne jednego z budynków pokrywa warstwa roślinności, a pustka powietrzna w przegrodzie została wypełniona pianką poliuretanową. Stanowiska wyposażono w czujniki pomiarowe z automatyczną rejestracją mierzonych parametrów, które rejestrowały parametry powietrza w pomieszczeniu, temperatury powierzchni ścian zewnętrznych, a także temperatury w otoczeniu roślinności. Przeprowadzono analizy zmierzonych i wyznaczonych parametrów dotyczących m.in. zawartości wilgoci w powietrzu wewnętrznym, temperatury promieniowania przegród w budynkach z roślinnością na ścianach i bez niej.

Kolejny etap niniejszego opracowania to modyfikacja istniejącego w literaturze modelu opisującego przepływ ciepła przez przegrodę z roślinnością. Uwzględniono adaptację modelu do warunków klimatu umiarkowanego ciepłego typu przejściowego w okresie zimnym, a także do zmiany wskaźnika ulistnienia *LAI*. W celu modyfikacji modelu wykorzystano metody oraz narzędzia do statystycznych analiz danych. Ponadto do weryfikacji zmodyfikowanego modelu [27] zastosowano dane zarejestrowane na wykonanym stanowisku pomiarowym.

W celu oceny oraz porównania odczuć cieplnych mieszkańców budynków z warstwą roślinności i bez niej przeprowadzono badania ankietowe, oraz pomiary parametrów mikroklimatu w pomieszczeniach. Na tej podstawie wykonano obliczenia oraz analizy wielkości wybranych wskaźników komfortu cieplnego w obiektach objętych badaniami terenowymi.

W celu określenia wpływu zielonej ściany na energochłonność budynku oraz parametry komfortu termicznego wykonano symulacje i analizy w programie *WUFI Plus*, opracowanym przez Instytut Fraunhofera, którego działania bazują na modelu higrotermicznym Künzl'a.

#### **4. Zielone ściany**

W Polsce, w Europie, jak i na całym świecie trend zrównoważonego budownictwa cały czas się rozwija. Roślinność na przegrodach budynków oraz w ich pobliżu, jak m.in. drzewa, krzewy, trawy, jest jednym z jego elementów. Rośliny mogą pokrywać przegrody pionowe, tworząc zielone ściany, a także zajmować zewnętrzne konstrukcje poziome – zielone dachy. Zielone ściany mogą być stosowane na zewnątrz budynków, czego dotyczy niniejsze opracowanie, jak i w ich wnętrzach.

Pierwsze wzmianki na ten temat roślinności na przegrodach dotyczą wiszących ogrodów Babilonu sprzed około 2,5 tysiąca lat. W okresie nowożytnym wykorzystywano rośliny pnące na ścianach zewnętrznych jako element ozdobny budynków. Ich zastosowanie pełniło także funkcję zacienienia obiektu [28]. System zielonych ścian zaczął ponownie pojawiać się w przestrzeni publicznej w latach 80 - tych XX - go wieku. Francuski botanik, Patric Blanc zaprojektował wówczas system żywych ścian [29]. W ostatnich latach rozwiązania polegające na zastosowaniu roślin na przegrodach przeżywają renesans, ma to bezpośredni związek z wieloma korzyściami płynącymi z ich wykorzystania.

#### **4.1. Klasyfikacja zielonych ścian**

Podstawowym podziałem roślinności na ścianach, jakie wskazuje literatura [30], jest sklasyfikowanie ich ze względu na stosowaną konstrukcję. Wyszczególnia się zielone fasady, w których substrat glebowy znajduje się u podnóża przegrody oraz żyjące ściany, których system korzeniowy rozmieszczony jest na powierzchni całej ściany. Rozwiązania te różnią się stosowaną roślinnością. Pełną klasyfikację przedstawia Rysunek 1.

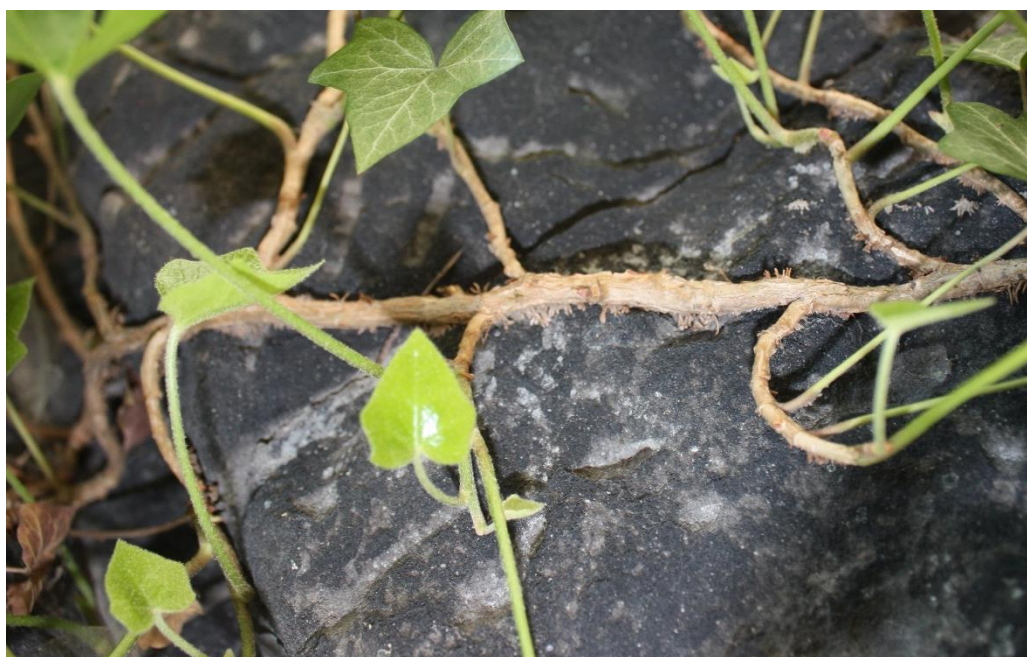


Rysunek 1 Klasyfikacja zielonych ścian (opracowane i tłumaczenie własne na podstawie [28,30])

Elementy konstrukcyjne zarówno zielonych fasad, jak i żyjących ścian stosowanych na zewnątrz budynków, powinny być wykonane z materiałów trwałych i odpornych na działanie warunków atmosferycznych, takich jak np. aluminium, stal ocynkowana bądź nierdzewna [29].

### *Zielone fasady*

Do zielonych fasad wykorzystywane są rośliny pnące, które wspinają się bezpośrednio po ścianie lub po specjalnie przygotowanej do tego konstrukcji znajdującej się w pewnej odległości od przegrody.



Zdjęcie 1 Korzonki czepne winobluszczu (kolekcja autorki)

Zielone fasady dzieli się na bezpośrednie i pośrednie. W przypadku pierwszych z nich, stosuje się roślinność posiadającą zdolność „przyczepiania się” do ściany. Taką właściwość mają np. winobluszcz trójklapowy (Zdjęcie 1), bluszcz pospolity czy hortensja pnąca [31]. Natomiast fasady pośrednie wykonuje się w pewnej odległości od ściany, wykorzystując przy tym elementy, po których pnącza mogą się okręcać i wspinać, np. stalowe linki oraz siatki. To rozwiązanie wymaga roślinności o wskazanej wyżej charakterystyce, w tym celu idealnie sprawdza się np. dławisz, wiciokrzew czy glicyna [31]. Niekwestionowanym atutem stosowania zielonych fasad jest niewielka ilość gleby niezbędna do uprawy pnączy, a co za tym idzie także waga rozwiązania, o czym mowa w punkcie 4.2 *Zalety i ograniczenia zielonych ścian* niniejszego opracowania.

## *Żyjące ściany*

System żywych ścian charakteryzuje się wykorzystaniem dedykowanych skrzynek, koszy lub paneli umieszczonych na całej powierzchni ściany, w których znajduje się podłoże glebowe wraz z roślinami [32]. Ten rodzaj zielonej ściany zazwyczaj stanowi odrębną konstrukcję, która znajduje się w pewnej odległości od przegrody. Roślinność wykorzystywana do systemu żyjących ścian zazwyczaj posiada płytki system korzeniowy, przykładem są m.in. mchy, trawy i krzewy [33]. Choć najpopularniejszym rozwiązaniem jest stosowanie substratu glebowego do nasadzeń, to można go zastąpić geowłókniną [34]. Dodatkowo, ze względu na ryzyko zawilgocenia przegrody pionowej, stosuje się rozwiązania, w którym roślinność znajduje się w podłożu filcowym izolowanym od ściany panelami PCV [35].

W przypadku ogrodów wertykalnych nawadnianie realizowane jest poprzez specjalnie do tego celu przeznaczony system rozsączający, mogący wykorzystywać zgromadzoną wcześniej wodę deszczową. Oprócz wody, do prawidłowego wzrostu roślinność potrzebuje składników odżywczych, które są rozprowadzane przez dedykowane temu aplikatory nawozów [29].

## *Popularne zielone ściany* [36]

Najpopularniejsze zielone ściany zostały zaprojektowane przez francuskiego botanika i artystę Patricka Blanca. Należą do nich ściany m.in.:

- *Muzeum CaixaForum*, Madryt, Hiszpania,
- *Musée du Quai Branly*, Paryż, Francja,
- *Oasis of Aboukir*, Paryż, Francja,
- *La Grande Epicerie*, Paryż, Francja,

Ogród wertykalny znajdujący się na budynku *Muzeum CaixaForum* w Madrycie (Zdjęcie 2) to żyjąca ściana złożona z ponad 15 000 roślin, które zajmują łączną powierzchnię około 460m<sup>2</sup>. Ich nawodnienie realizowane jest poprzez zautomatyzowany system składający się z sieci rur, natomiast sama uprawa odbywa się bez użycia gleby.

Druga ze ścian została wykonana w 2004 roku, jednak w latach 2017 - 2018 poddano ją renowacji. Obecnie, żyjąca ściana na *Musée du Quai Branly* (Zdjęcie 3), składa się z 15 000 roślin w 376 odmianach. Jej zadaniem jest podniesienie estetyki obiektu, ale również wzmocnienie izolacji termicznej oraz akustycznej.





Zdjęcie 2 Muzeum CaixaForum, Madryt, Hiszpania  
(<https://www.verticalgardenpatrickblanc.com/realisations>)



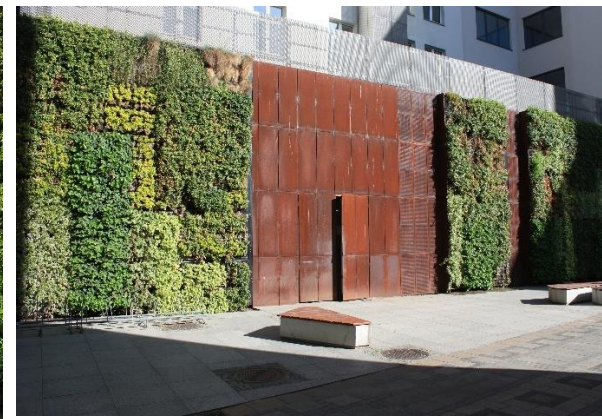
Zdjęcie 3 Musée du Quai Branly, Paryż, Francja  
(<https://www.verticalgardenpatrickblanc.com/realisations>)

Natomiast jednym z największych ogrodów wertykalnych w Stanach Zjednoczonych jest *Gardenhouse* w Beverly Hills. Budynek oddano do użytku w 2020 roku. Ściany części handlowej obiektu zostały pokryte roślinnością odporną na lokalne warunki klimatyczne. Do jej budowy wykorzystano sukulenty, które nie wymagają nawadniania, dzięki czemu są łatwe i oszczędne w utrzymaniu.

Równie popularnym wśród ogrodów wertykalnych jest ogród znajdujący się przy Worth Avenue, Palm Beach na Florydzie. Jedną z przegród sklepu *Saks Fifth Avenue* zdołał zbudować prawie 11 000 roślin, a koszt całego projektu wyniósł około 250 tys. dolarów. Pomysł na ścianę wykonaną z roślinności został zaczerpnięty z jednej z koncepcji Patrica Blanca.



Zdjęcie 4 Bezpośrednia zielona ściana na budynku Muzeum Narodowego we Wrocławiu (kolekcja autorki)



Zdjęcie 5 Żyjąca ściana na terenie Urzędu Miejskiego we Wrocławiu (kolekcja autorki)

Budynki pokryte roślinnością znajdują się także w Polsce. Najpopularniejszym z nich jest Muzeum Narodowe we Wrocławiu, co przedstawia Zdjęcie 4. Jego ściany zewnętrzne pokryte



są winobluszczem, które zasadzono ponad 20 lat temu. W stolicy Dolnego Śląska znajduje się również żyjąca ściana. Zdjęcie 5 prezentuje jedną z nich zainstalowaną na dziedzińcu Urzędu Miejskiego.

## **4.2. Zalety i ograniczenia zielonych ścian**

Wykorzystanie roślinności na przegrodach niesie ze sobą szereg korzyści, ale także wiąże się z pewnymi ograniczeniami. Warto podkreślić, że zielone ściany, w większości przypadków pozytywnie wpływają na przegrody oraz na ich otoczenie, co zostało szeroko opisane w wielu publikacjach [3–9,28,34,37].

Rośliny stosowane na zewnątrz i wewnątrz obiektów budują barierę akustyczną, dzięki której dany obszar jest izolowany od hałasów pochodzących ze środowiska zewnętrznego. Pierwsze rozwiązania wykorzystujące roślinność w akustyce opierały się na odseparowaniu dźwięków komunikacyjnych. Izolacyjność akustyczna roślinności zależy od wielu czynników m.in. od typu wykorzystanej konstrukcji oraz rodzaju zastosowanej zieleni, w tym ilości liści i kąta ich nachylenia [38]. Wykazano także wpływ zielonej ściany na izolacyjność akustyczną w budynkach [9,39,40]. Opisane w literaturze badania laboratoryjne żyjącej ściany potwierdziły, że ma ona wpływ na obniżenie poziomu hałasu w środowisku wewnętrznym. W opisanym badaniu wyznaczono ważony wskaźnik redukcji hałasu ( $R_w$ ), który wyniósł 15dB, a także ważony współczynnik pochłaniania dźwięku ( $a$ ) równy 0,40 [41]. Pomiary zielonych ścian w warunkach rzeczywistych [39] dowiodły, że warstwa roślinności o niewielkiej grubości wynoszącej 20÷30 cm, może wygłuszyć dźwięki pochodzące z obszarów komunikacyjnych o 1dB, a szum akustyczny nawet o 3dB. Natomiast analizy numeryczne zrealizowane w dedykowanym oprogramowaniu wykazały, że wartość redukcji hałasu może osiągnąć nawet 4dB(A) [40].

Kolejną zaletą stosowania roślinności na ścianach jest ochrona muru przed zasiekającym deszczem i zapobieganie wnikaniu wilgoci w jego strukturę, co skutkuje niwelowaniem dużych wahań różnic wilgotności w przegrodzie [5,9]. Ma to miejsce, gdy na przegrodzie zostanie zaimplementowana bezpośrednia zielona fasada z zastosowaniem roślinności posiadającej przyłgi, przyssawki i korzonki czepne [31]. Jednak najkorzystniejszymi rozwiązaniami w kontekście wilgotności ściany są te, oparte na zastosowaniu zieleni w pewnej odległości od muru. Wówczas przestrzeń pomiędzy fasadą budynku a zieloną ścianą pozwala na migrację powietrza, co wspomaga osuszanie przegrody [3].

Następnym pozytywnym aspektem jest obniżenie energochłonności budynków. Roślinność ze względu na swoje właściwości tworzy warstwę izolacyjną [3–9]. Efekt ten jest widoczny nie tylko latem, ale także w okresie zimnym w przypadku zastosowania roślin zimozielonych [4,6,42,43]. Zimą zielona ściana tworzy barierę przed bezpośrednim działaniem wiatru na przegrodę [3–9]. Badania wskazują, że znaczny ruch powietrza przy ścianie może obniżyć efektywność energetyczną budynku nawet o 50%, a także wpływać negatywnie na przegrody uszkodzając ich powierzchnie. Roślinność w formie zielonej ściany tworzy swego rodzaju bufor między przegrodą a masą poruszającego się powietrza, co doskonale ukazuje Wykres 1. Dzięki temu jego oddziaływanie jest zminimalizowane, co wpływa na ograniczenie wychłodzenia dolnej części budynku w okresach chłodnych [4]. Literatura [7] wskazuje, że zastosowanie zielonych ścian może zmniejszyć zapotrzebowanie obiektu na ciepło nawet o 25%.

W miesiącach ciepłych roślinność wpływa na obniżenie temperatury przegrody. W tym celu wykorzystuje chłodzenie ewaporacyjne z roślin i jego podłoża, a także wytworzone zacienienie [44,45]. Przedstawia to Wykres 1, na którym zaprezentowano profile temperatury i prędkości powietrza dla różnych typów zielonej ściany. Na ich podstawie wnioskować można, że zmiany temperatury mogą wahać się w mniejszym, bądź większym zakresie przy uwzględnieniu zmienności temperatury zewnętrznej, a także z uwagi na różne usytuowanie ściany względem kierunków świata. Ponadto roślinność na przegrodach wpływa na obniżenie energii przeznaczonej na chłodzenie latem [7,46]. Badania [7] przeprowadzone w mieście Hong Kong wskazują, że pośrednia zielona fasada w miesiącach ciepłych, w których średnia temperatura zewnętrzna sięga 28°C, może zredukować zużycie energii na potrzeby chłodzenia powietrza o około 76%. Natomiast eksperyment przeprowadzony w Hiszpanii w warunkach klimatu śródziemnomorskiego kontynentalnego, wskazał oszczędność energii na poziomie blisko 59% dla żyjącej ściany oraz niespełna 34% przy zastosowaniu zielonej fasady. Na tej podstawie można stwierdzić, iż redukcja energii przeznaczonej na chłodzenie jest zależna od średnich temperatur zewnętrznych panujących w środowisku oraz zastosowanego rozwiązania zielonej ściany.



murowanych ścianach, dzięki czemu zielone ściany mogą opóźnić biologiczne niszczenie fasad budynków [37]. Należy jednak mieć na uwadze, że procesy chemiczne, w których następuje zbyt duża asymilacja gazów ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ), mogą degradować komórki i tkanki roślin, co w konsekwencji jest dla roślin szkodliwe [49]. Ponadto, cząstki pyłu adsorbowane w warstwie powierzchniowej liści w warunkach silnego wiatru i deszczu mogą wracać do atmosfery, bądź zostać wchłonięte w glebę [52].

Niewątpliwie, wykorzystanie roślinności na ścianach wpływa pozytywnie na otaczający mikroklimat. Jednak ich stosowanie ma także pewne ograniczenia, które należy uwzględnić już na etapie projektowania.

Szczególne uwagę należy zwrócić na ciężar roślin i elementów konstrukcyjnych. Ich średnie wartości dla przykładowych rozwiązań przedstawia Tabela 1. W zależności od zastosowanego rozwiązania parametry te różnią się od siebie. Zielona elewacja jest najlżejszym rozwiązaniem, bo na  $1 \text{ m}^2$  ściany budynku średnio przypada 5 kg roślin. Natomiast najbardziej ingerującą i obciążającą konstrukcję obiektu, ze względu na konieczność kotwienia i ciężar całkowity, jest żywa ściana wykonana z modułów skrzynkowych, której waga wynosi około  $100 \text{ kg/m}^2$ .

Tabela 1 Przykładowe uśrednione masy i koszty zielonej ściany (opracowane na podstawie [6,53,54])

Typ zielonej ściany	Bezpośrednia zielona fasada	Pośrednia zielona fasada		Żyjąca ściana		
		Z wykorzystaniem siatki metalowej	Z wykorzystaniem skrzyni na substrat glebowy	Modułowa w skrzynkach	Modułowa w elastycznych torbach	Modułowa z podłożem piankowym
Waga	5 kg/m <sup>2</sup>	6,5 kg/m <sup>2</sup>	25-60 kg/m <sup>2</sup>	100 kg/m <sup>2</sup>	20 kg/m <sup>2</sup>	45 kg/m <sup>2</sup>
Koszt	30-45 €/m <sup>2</sup>	35-75 €/m <sup>2</sup>	100-800 €/m <sup>2</sup>	400-600 €/m <sup>2</sup>	350-750 €/m <sup>2</sup>	750-1200 €/m <sup>2</sup>

Zielona fasada charakteryzująca się nasadzeniem roślinności u podnóża ściany, i której system korzeniowy pobiera wodę z obszaru fundamentów, pozytywnie wpływa na gospodarkę wodną tej przestrzeni. Zieleń może zmniejszyć ryzyko podciągania kapilarnego, szczególnie w budynkach wykonanych w starych technologiach pozbawionych izolacji przeciwwilgociowej oraz tam, gdzie ta izolacja została uszkodzona [31]. Ograniczeniem związanym z wykorzystaniem roślinności na przegrodzie może być materiał, z którego została wykonana ściana, a w szczególności uszkodzenia jej powierzchni. Natomiast, należy mieć na uwadze to, że niektóre pnącza wykorzystując mikropęknięcia na powierzchni ściany, mogą powodować deteriorację materiału [3]. Jak wskazują źródła literaturowe, mur z cegły pełnej na

zaprawie cementowo - wapiennej, jak i otynkowana przegroda będą odpowiednim podłożem do zastosowania roślinności [3,32], jednak w przypadku uszkodzeń powinno się je wcześniej właściwie zabezpieczyć.

Roślinność na ścianach niesie ze sobą także inne ograniczenia. Przede wszystkim pnącza, ale także rośliny innego rodzaju mogą zarastać otwory okienne i penetrować rynny. Dlatego istotne ich ciągle dogłębne i przycinanie roślin, co może generować dodatkowe koszty związane jej z utrzymaniem. Ponadto, niejednorodne ulistnienie zielonej ściany może skutkować tym, że przez kilka lat system będzie nieefektywny pod względem termicznym czy zabezpieczenia przeciwwilgotnościowego. Mogą mieć na to wpływ warunki glebowe, nieodpowiedni dobór roślin lub zła konstrukcja, np. o zbyt małym rozstawie mocowań. Ponadto roślinność utrzymując wilgoć w najbliższym otoczeniu, może powodować zatrzymywanie wilgoci w ścianach i kondensację pary wodnej na powierzchni muru. To z kolei zwiększa ryzyko powstawania pleśni, dlatego istotne jest odpowiednie zaprojektowanie systemu, jak i zabezpieczenie ściany [31].

Należy mieć na uwadze fakt, że każda roślina posiada indywidualne wymagania (Tabela 2) oraz różny czas wzrostu. Niektóre z nich nadają się w miejsca bardzo nasłonecznione, nieliczne natomiast preferują zacienienia, a źle reagują na bezpośrednie promieniowanie słoneczne. Dlatego istotna jest ekspozycja elewacji, która ma zostać zazieleniona i dobór do niej odpowiedniej roślinności.

- Ekspozycja północna – dominuje na niej cień i półcień. Odpowiednia dla roślin, które nie posiadają wygórowanych wymagań pod kątem oświetlenia.
- Orientacja południowa – stanowisko narażone na bezpośrednie promieniowanie słoneczne. Idealna dla roślin potrzebujących dużego nasłonecznienia oraz wysokiej temperatury.
- Ściana skierowana na wschód – charakterystyczne łagodne nasłonecznienie. Sprawdza się tu roślinność preferująca niskie natężenie promieniowania słonecznego.
- Ekspozycja zachodnia – wysokie temperatury i wyższe natężenie promieniowania w godzinach popołudniowych.

Tabela 2 Rośliny i ich wymagania najczęściej stosowane do budowy zielonych fasad w klimacie polskim umiarkowanym (opracowanie własne na podstawie [31])

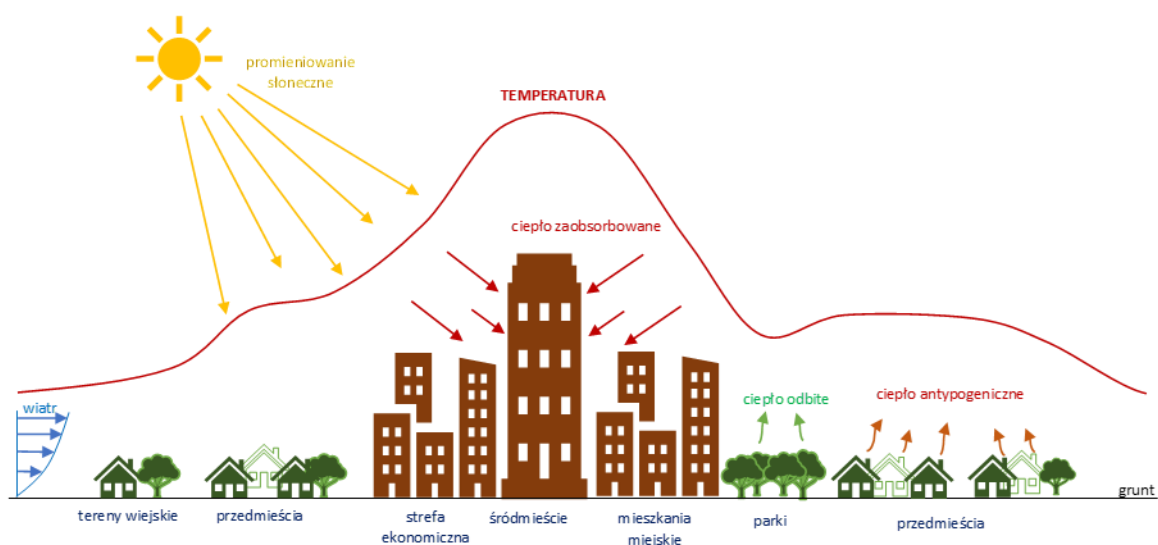
Nazwa polska	Nazwa łacińska	Preferencje rośliny	Sposób wzrostu i podtrzymania
winobluszcz trójklapowy	Parthenocissus tricuspidata	mrozoodporna, lubi półcień	Nie wymaga podpór ani stelaży. Posiada zdolność wykorzystywania naturalnej porowatości przegrody w celu wspinania się po niej.
winobluszcz pięciolistkowy	Parthenocissus quinquefolia	mrozoodporna, lubi półcień	
bluszcz pospolity	Hedera helix	ciepłolubna, cieniolutna	
hortensja pnąca	Hydrangea petiolaris	lubi półcień	
milin	Campsis sp.	ciepłolubna, lubi nasłonecznione miejsca	
glicyna	Wisteria sp.	ciepłolubna, lubi nasłonecznione miejsca	Okręca się wokół elementów pionowych, linkach rozpinanych na podporach oraz odpowiednich ramach.
wiciokrzew	Lonicera sp.	lubi półcień	
dławisz	Celastrus sp.	mrozoodporna	
chmiel	Humulus sp.	lubi półcień i miejsca nasłonecznione	
winobluszcz zaroślowy	Parthenocissus inserta	lubi półcień i miejsca nasłonecznione	Pnie się po sztywnych podporach z prętami stalowymi lub drewnianymi. Do ściany przyczepiają się wykorzystując naturalne wąsy i ogonki liściowe.
aktinidia	Actintdia sp.	mrozoodporna, lubi półcień	
kokornak	Aristolochia sp.	cieniolutna	
rdest	Falopa sp.	ciepłolubna, lubi nasłonecznione miejsca	
męczennica	Passifora sp.	lubi półcień	
winnik	Ampelopsis sp.	lubi nasłonecznione miejsca	
powojnik	Clematis sp.	lubi półcień	

Na rynku europejskim funkcjonuje wiele firm świadczących usługi związane z wykonywaniem zielonych ścian. Jak można odnaleźć w literaturze [6,53,54], koszt zielonej ściany może się znacznie różnić. Im bardziej skomplikowany projekt ogrodu wertykalnego, tym jego cena za 1m<sup>2</sup> produktu jest wyższa. Najmniej kosztownym rozwiązaniem jest zielona fasada, jej koszt w zależności od zastosowanego rozwiązania waha się między 30 a 75 €/m<sup>2</sup>, a przy wykorzystaniu dodatkowych skrzyń na substrat glebowy nawet do 800 €/m<sup>2</sup>. Cena wykonania żywej ściany może być jeszcze wyższa. W zależności od użytego materiału, rodzaju mocowania oraz zastosowanej roślinności, 1m<sup>2</sup> żywej ściany może osiągnąć cenę nawet 1200€.

### 4.3. Zielone ściany a polityka miast

Duże aglomeracje zmagają się coraz częściej ze zjawiskiem zwanym miejską wyspą ciepła (*UHI, Urban Heat Island*). Zastępowanie obszarów biologicznie czynnych, a także materiałów przepuszczalnych materiałem nieprzepuszczalnym powoduje lokalnie wzrost temperatury powietrza

oraz temperatury odczuwalnej. Zjawisko to obserwowane jest w szczególności w centrach miast [55], co przedstawia Rysunek 2. Efekt dodatkowo potęgowany jest poprzez zamykanie korytarzy powietrznych oraz wzrost poziomu zanieczyszczeń. Co istotne, występowanie miejskiej wyspy ciepła nie ogranicza się do miast zlokalizowanych w strefach klimatycznych o ekstremalnie ciepłych warunkach. Coraz częściej zjawisko obserwowane jest w strefach umiarkowanych, także w Polsce, dlatego istotne jest wdrożenie działań dążących do zmniejszenia tego efektu. Takich jak implementacja roślinności w obszarach miejskich oraz na budynkach zlokalizowanych w miejscach o gęstej tkance, czy zastępowanie nawierzchni nieprzepuszczalnych przepuszczalnymi.

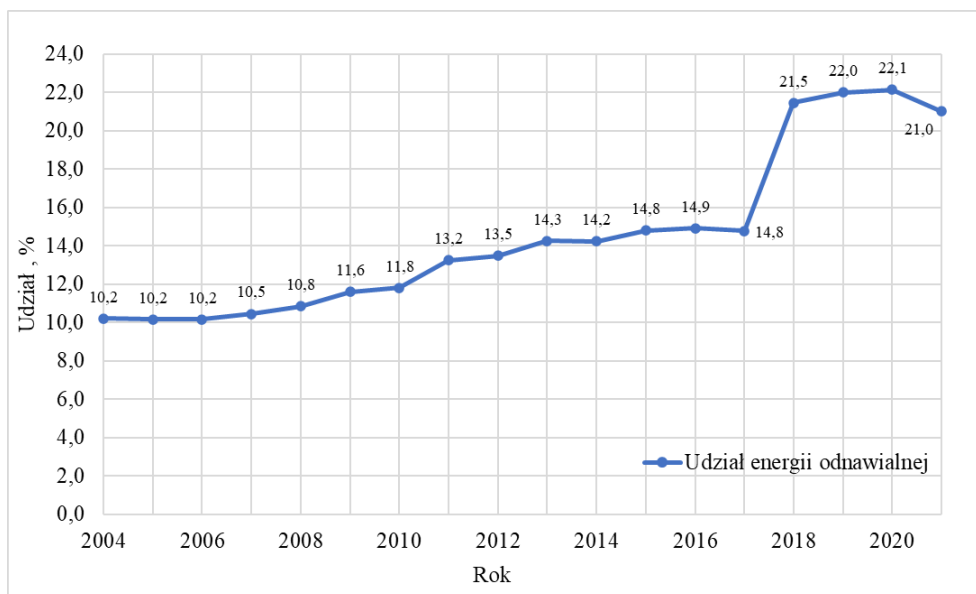


Rysunek 2 Miejska wyspa ciepła (opracowanie własne)

Lokalny wzrost temperatury powietrza przyczynia się do zwiększenia temperatury powierzchni ścian oraz energii zgromadzonej w przegrodach. W okresie letnim ciepło transportowane jest do wnętrza budynku, co podwyższa temperaturę w pomieszczeniach i zwiększa popyt na energię przeznaczoną do wytworzenia chłodu. Natomiast zimą w celu utrzymania właściwych parametrów powietrza niezbędne jest zapewnienie ogrzewania.

Zarówno generowanie ciepła, jak i chłodu wymaga doprowadzenia energii [56]. W głównej mierze niezbędna w tym celu jest energia elektryczna. W Polsce tylko niewielka jej część pochodzi ze źródeł odnawialnych, w ostatnich latach stanowiła ona tylko około 22%, co ukazuje Wykres 2. Największa produkcja pochodziła ze spalania węgla kamiennego i brunatnego (48% oraz 29%, dane z roku 2019) [57]. To one w głównej mierze odpowiedzialne są za zanieczyszczenia powietrza, a w szczególności te występujące na obszarach miast. Analizy wykazują, że głównym źródłem emisji pyłu PM<sub>2.5</sub>, benzo(a)pirenu oraz pyłu PM<sub>10</sub>

jest ogrzewanie mieszkań i domów, czyli tzw. sektor komunalno-bytowy [58–60]. Między innymi one są odpowiedzialne za tworzenie się miejskiej wyspy ciepła, jak i mają wpływ na zmianę klimatu, która ukazuje się występowaniem skrajnych zjawisk meteorologicznych np. fal wysokich temperatur (ang. – *heat waves*) czy czasowego występowania skrajnie niskich temperatur. Dlatego istotne jest ograniczenie emisji, a stosowanym w tym celu procesem może być zminimalizowanie zapotrzebowania energii na cele ogrzewania i chłodzenia.



Wykres 2 Udział energii odnawialnej w końcowym zużyciu energii brutto w Polsce w latach 2004 - 2021 (opracowanie własne na podstawie [61])

Przepisy prawa, choćby takie jak Dyrektywa Parlamentu Europejskiego [62] w jednym z punktów zwraca uwagę na wykorzystanie rozwiązań naturalnych w celu obniżenia popytu na energię przez budynek. Władze miast w celu przeciwdziałania negatywnym skutkom zmiany klimatu, poszukują innych rozwiązań oraz oferują wsparcie, także finansowe, w związku z realizacją działań sprzyjającym środowiskom miejskim. Termomodernizacja budynków jest jednym z narzędzi do obniżenia ich energochłonności, poprawy szczelności, a także do redukcji generowanych przez nie zanieczyszczeń. Izolacja ścian zewnętrznych, dachu, czy wymiana stolarki okiennej oraz drzwiowej to najpopularniejsze z metod. Tam, gdzie tkanka miejska jest gęsta, a zabudowania w dużej części stanowią budynki dawne i zabytkowe, tego typu prace modernizacyjne mogą być utrudnione, a ich zakres może być ograniczony. Proces pełnej termomodernizacji obejmuje także wymianę instalacji wewnętrznych, w tym centralnego ogrzewania, nie należy zapominać o odpowiednio zaprojektowanej wentylacji [63,64].



Wszystkie powyższe czynności powinny dążyć do podniesienia komfortu termicznego mieszkańców.

Zwiększanie obszarów biologicznie czynnych, budowa zielonych dachów oraz tworzenie zielonych ścian na obszarach zabudowanych, wpisuje się zarówno w myśl redukcji miejskiej wyspy ciepła, jak i w ideę zrównoważonego rozwoju. Dzięki nim możliwe jest zrewitalizowanie istniejących budynków oraz ukrycie nieestetycznych ścian zewnętrznych. Liczne miasta w całej Europie i na świecie skorzystały z tego rozwiązania, co zostało przedstawione w literaturze [65]. Zestawienie liczby działań ukazuje Tabela 3. Należą do nich motywacyjnych obniżenie podatków od nieruchomości, obniżenie opłaty za wodę deszczową, obniżenie innych podatków, subsydia oraz obniżenie stopy procentowej.

Tabela 3 Zestawienie liczby działań motywacyjnych na świecie na podstawie literatury, dane do roku 2018 (tłumaczenie własne na podstawie [65])

Kontynent	Redukcja podatków			Finansowanie	
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2
Europa	-	3	1	60	2
Azja	-	-	-	7	1
Północna Ameryka	2	7	4	9	1
Południowa Ameryka	4	-	2	-	-

1.1. Obniżenie podatku od nieruchomości; 1.2. Obniżenie opłaty za wodę deszczową; 1.3. Obniżenie innych podatków;

2.1. Subsydia; 2.2. Obniżenie stopy procentowej

Przykładami europejskich miast, które wprowadziły zachęty do stosowania roślin na przegrodach, mogą być Bazylea, Hamburg, Kraków czy Wrocław. W ramach programów popularyzujących zielone rozwiązania znajdują się m.in. zachęty dla inwestorów w postaci dotacji. Takim narzędziem jest program *LIFE*, który jest jednym z środowiskowych narzędzi Unii Europejskiej działającym od 1992 roku, skierowany zarówno dla podmiotów publicznych, jak i prywatnych [33,66]. W pierwszym kwartale 2021 roku wydano nowe rozporządzenie, które określa zasady Programu *LIFE* na lata 2021 - 2027. Na działania z obszarów „Środowisko” oraz „Działania na rzecz klimatu” przeznaczono łącznie 5,4 mld €.

Ponadto, w 1995 roku przez władze miasta Bazylei zorganizowany został fundusz, na którym gromadzono środki w postaci 4% wpływów z opłat za zużycie energii elektrycznej. To rozwiązanie pozwoliło na dofinansowanie każdego nowopowstającego zielonego dachu w kwocie 20 €/m<sup>2</sup>. Dzięki temu w ciągu 18 miesięcy powstało 120 dachów pokrytych roślinnością o łącznej powierzchni około 8000m<sup>2</sup>. W roku 2005 ponownie wdrożono system

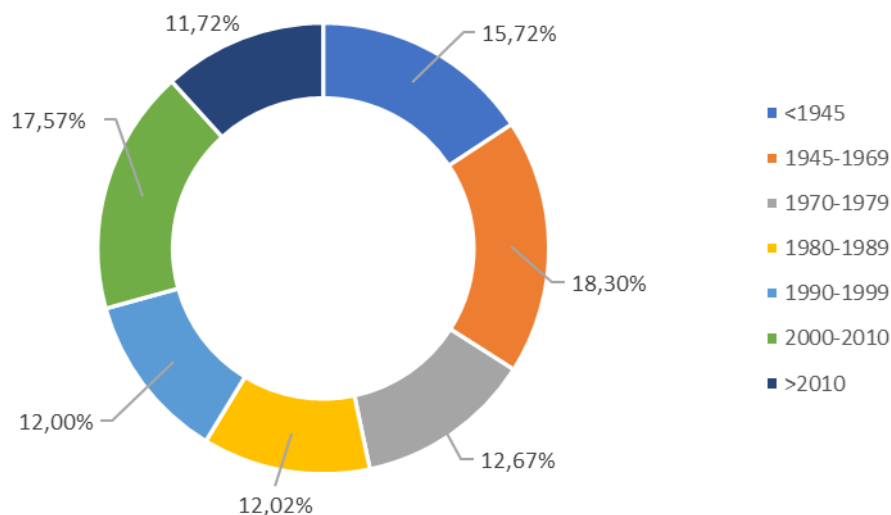
zachęt polegający na dotacjach, tym razem w wyższej kwocie 35 €/m<sup>2</sup>. Skutkiem czego, co czwarty dach w Bazylei został zazieleniony [67].

Podobnie jak w Bazylei, tak i w niemieckim Hamburgu zachętą do zazieleniania powierzchni budynków są dofinansowania. W 2014 ruszył tam program realizujący ideę zielonego inteligentnego miasta. Od połowy 2020 roku można uzyskać dotacje w formie zryczałtowania nawet 40% kosztów kwalifikowanych przeznaczonych na zazielenienie elewacji [68].

Natomiast władze Wrocławia wprowadziły zwolnienia od podatku od nieruchomości w ramach intensyfikacji powstawania terenów zielonych. System ten działa już od 2015 roku, a ulgi są przyznawane na budynki, w których zostały zainstalowane ogrody wertykalne, jak i zielone dachy. Program ten ma pewne obostrzenia, dotyczą one minimalnej powierzchni 15m<sup>2</sup> ścian pokrytych roślinnością. Ponadto zwolnienie dotyczy tylko podatku dla powierzchni mieszkalnych. [69,70]

## **5. Materiały budowlane i izolacyjne wykorzystywane w budynkach**

Struktura budownictwa na świecie jest bardzo zróżnicowana. Zdecydowaną przewagę, bo ponad 75% całkowitej powierzchni budynków w Europie [1] stanowią obiekty mieszkalne. Należy mieć na uwadze, że niewiele z nich to budynki nowe (Wykres 3). Pozostałe, często wymagają remontów z uwagi na ich wysoką energochłonność. Należy mieć również na uwadze także fakt, że wśród nich znajdują się obiekty pod opieką konserwatorską. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego tylko w Polsce znajduje się ponad 78 tys. zabytków (dane na dzień 16.01.2020). Żeby budynek mógł zostać wpisany do rejestru zabytków, musi charakteryzować się odpowiednimi walorami. Jednym z nich jest wiek. Budynek uznany za zabytkowy powinien być starszy niż 50 lat, a takich, wśród obiektów mieszkalnych jest prawie 40% [71,72].



Wykres 3 Budynki mieszkalne w Polsce według daty budowy, dane na rok 2017 (opracowanie własne na podstawie [1])

W Polsce do roku 1945 najczęściej powstawały budynki z muru z cegieł i łupanego kamienia [73]. Stosowano także konstrukcję muru pruskiego, czyli drewnianej ściany szkieletowej wypełnionej cegłą. W kolejnych dwudziestu latach, w okresie powojennym ściany zewnętrzne wykonywane z cegły pełnej o grubości 450mm były najbardziej popularne. W niewielkiej części z nich stosowano tynki. Znaczny odsetek tego rodzaju budynków to kamienice oraz budynki przylegające do nich np. oficyny<sup>1</sup> (Zdjęcie 6). Dopiero lata 60 - te były początkiem budownictwa wielkopłytkowego, które często wykorzystywane było aż do przełomu lat 80 i 90 - tych. Wtedy zaczęto wykorzystywać konstrukcje żelbetowe [73]. Najpopularniejsze materiały konstrukcyjne i izolacyjne oraz ich właściwości przedstawia Tabela 4.

<sup>1</sup> oficyna – budynek wewnątrz kwartału. Dawniej przeznaczone były dla biedniejszych mieszkańców [168]



Zdjęcie 6 Oficyna znajdująca w Przedmieściu Oławskim, Wrocław (kolekcja autorki)

Zazwyczaj w obiektach objętych ochroną konserwatorską, wykonanie docieplenia niesie ze sobą szereg problemów. Z uwagi na zabytkowy charakter elewacji, zastosowanie tradycyjnej izolacji ściany od strony zewnętrznej może okazać się niemożliwe, albo bardzo utrudnione. W takich przypadkach najczęstszym rozwiązaniem jest docieplenie ścian zewnętrznych po ich wewnętrznej stronie, co wiąże się ze zmniejszeniem powierzchni użytkowej obiektów.

### 5.1. Najpopularniejsze materiały stosowane do dociepleń i ich właściwości

Termoizolacja budynków może być wykonywana przy zastosowaniu różnych materiałów, a każda z przegród wymagać może innego rodzaju docieplenia. W przypadku ścian zewnętrznych najczęściej stosowanymi materiałami są styropian, wełna mineralna, płyty klimatyczne wykonane z bloczków silikatowych czy aerożel.

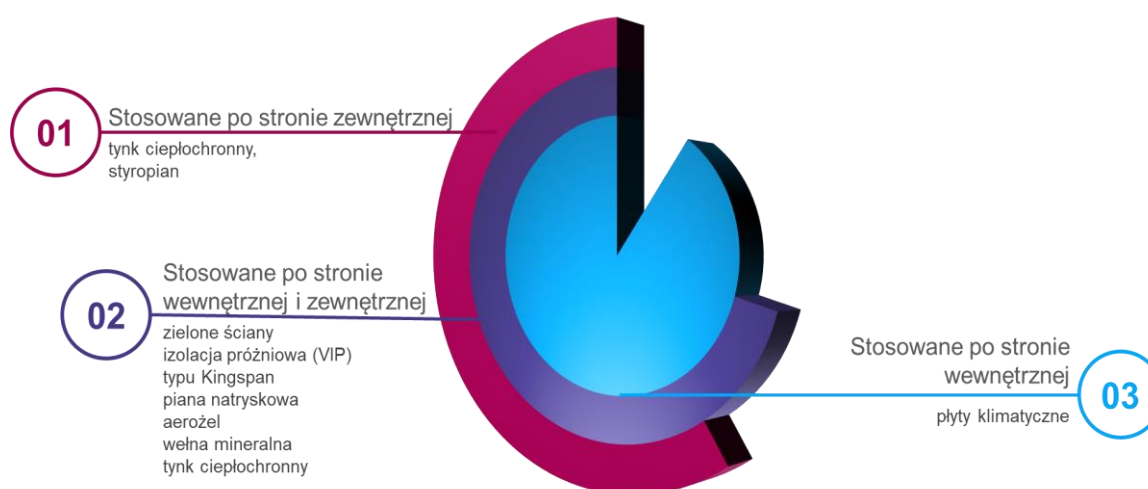
Tabela 4 Właściwości niektórych materiałów i przykładowe wartości charakterystycznych parametrów każdego z nich (opracowanie własne na podstawie [74–76])

Material / Parametr	Współczynnik przewodzenia ciepła deklarowany przez producentów	Gęstość objętościowa	Izolacyjność akustyczna	Współczynnik dyfuzji pary wodnej
	W/(m·K)	kg/m <sup>3</sup>	-	g/m <sup>2</sup> ·h·hPa
Drewno	0,45	300-860	bardzo mała	60·10 <sup>-4</sup>
Kamień	2,50	2500	mała	7,5·10 <sup>-4</sup>
Cegła pełna	0,77	2000	mała	105·10 <sup>-4</sup>
Beton	1,30	700	mała	200·10 <sup>-4</sup>

Materiał / Parametr	Współczynnik przewodzenia ciepła deklarowany przez producentów	Gęstość objętościowa	Izolacyjność akustyczna	Współczynnik dyfuzji pary wodnej
	W/(m·K)	kg/m <sup>3</sup>	-	g/m <sup>2</sup> ·h·Pa
Żelbet	1,70	2300	mała	30·10 <sup>-4</sup>
Styropian	0,04	10-15	mała	12·10 <sup>-4</sup>
Wełna mineralna	0,035	135-170	bardzo dobra	480·10 <sup>-4</sup>
Płyty klimatyczne	0,06	200-240	dobra	6,7·10 <sup>-4</sup>
Aerożel	0,014	1,9-150	bardzo dobra	> 45·10 <sup>-4</sup>

Materiały te różnią się wieloma parametrami, ich przykładowe wartości zawiera Tabela 4. Warto zauważyć, że materiały posiadające niski współczynnik przewodzenia ciepła ( $\lambda$ ) zazwyczaj stanowią dobrej jakości barierę dźwięków. Najbardziej skutecznym izolatorem, z uwagi na najniższy współczynnik  $\lambda$  jest aerożel [77]. Jest to jego ogromna zaleta, ponieważ bezpośrednio przekłada się on na niezbędną grubość zastosowanej izolacji. Ponadto jest to materiał przezierny, dzięki czemu może być w niektórych przypadkach wykorzystywany do izolacji budynków pod opieką konserwatora [78]. Aerożel ma bardzo dobre właściwości wygłuszające. Korzystnie pod tym względem wypada również wełna mineralna, jednak jej izolacyjność jest zdecydowanie mniejsza.

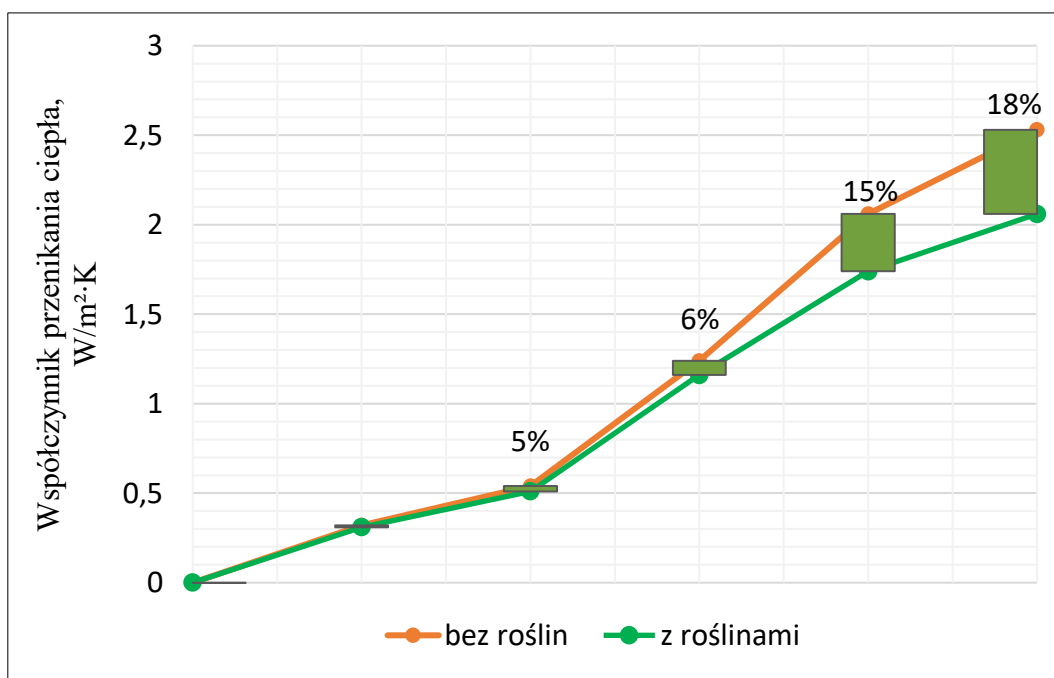
Należy mieć na uwadze fakt, że nie każdy z materiałów może być stosowany po stronie zewnętrznej, jak i wewnętrznej przegrody. Podział izolacji ze względu na zastosowanie przedstawia Rysunek 3. Kilka z nich takich jak np. roślinność, piana natryskowa czy wełna mineralna mogą być wykorzystywane zarówno przy izolacji od środka, jak i od zewnątrz przegrody.



Rysunek 3 Popularne materiały izolacyjne (opracowanie własne)

Jak wskazują badania, zielone ściany także mogą być wykorzystywane jako materiały izolacyjne. Co ważne, konserwatorzy zabytków zezwalają na takie rozwiązania, z uwagi na to, że mogą one opóźnić procesy biodeterioracyjne na zabytkowych murach [37]. W zależności od rodzaju wykorzystanej na budynku roślinności i jej konstrukcji mogą one w różny sposób wpływać na izolacyjność cieplną przegrody. Znaczenie ma tu typ zaimplementowanej roślinności, jej grubość, odległość od ściany. Rozpatrując przypadek wykorzystania bezpośredniej zielonej fasady, w której zastosowana roślinność utrzymuje liście także w okresie zimnym, można mówić o całorocznym obniżeniu współczynnika przenikania ciepła dla ściany ( $U$ ).

Wykres 4 przedstawia wpływ bezpośredniej zielonej fasady, złożonej z 35 - centymetrowej warstwy bluszczu, na przenikanie ciepła przez przegrodę zewnętrzną w okresie zimnym. Jak można zauważyć, pokrywa liści może znacząco wpływać na obniżenie współczynnika  $U$ . Wielkość zmiany wzrasta wraz ze zmniejszeniem się izolacyjności przegrody. W przypadku ściany zewnętrznej posiadającej współczynnik przenikania ciepła na poziomie  $2,5\text{W/m}^2\cdot\text{K}$  wskaźnik poprawy izolacyjności ściany może wzrosnąć nawet o 18%. To z kolei ma bezpośredni wpływ na obniżenie energochłonności budynku zimą [9]. W okresie letnim wartości te są wyższe [43,44].



Wykres 4 Wpływ pokrycia biologicznego na współczynnik przenikania ciepła dla ściany zewnętrznej w okresie zimnym (opracowanie własne na podstawie [9])

Roślinność poprzez pobieranie wody z przegrody za pomocą przylg, przyssawek i korzonków czepnych zabezpiecza ścianę przed bezpośrednim działaniem deszczu oraz powoduje utrzymanie wilgotności przegrody na niższym poziomie niż w przypadku ściany bez zieleni [31], co wpływa na redukcję współczynnika przenikania ciepła [9]. W tym przypadku roślinność stanowi także ochronę ściany [79]. Otynkowana przegroda zazwyczaj wymaga renowacji już po 25-30 latach, natomiast przy zastosowaniu i odpowiedniej pielęgnacji zielonej ściany, okres ten może zostać wydłużony nawet o 15 lat [3].

## 5.2. Wymagania dotyczące współczynnika przenikania ciepła dla ścian zewnętrznych w Polsce

Jak wspomniano w punkcie 5 niniejszego opracowania, znaczna część budynków to obiekty wybudowane w ubiegłym stuleciu. Wymagania izolacyjne poszczególnych elementów były inne niż wartości, na które wskazują dzisiejsze przepisy. Zarówno ustawa *Prawo budowlane* [80] oraz inne akty prawne, a obecnie Rozporządzenie *Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* [81], zawierają minimalne wartości współczynnika przenikania ciepła dla poszczególnych elementów obiektu wzniesionych w określonych latach. Dane te przedstawia Tabela 5.

Tabela 5 Wartości współczynnika przenikania ciepła dla ściany zewnętrznej według roku oddania budynku do użytkowania (opracowanie własne na podstawie [73,82])

Rok budowy budynku	Podstawa prawna i data	Wymagany współczynnik $U$ dla ścian zewnętrznych, $W/m^2 \cdot K$
Do 1966	<i>Prawo Budowlane:</i>	
	a) w środkowej i wschodniej części Polski mur 2 cegły b) w zachodniej części Polski mur z $1\frac{1}{2}$ cegły	1,16 1,40
1967-1985	<i>Norma PN-64/B-03404</i> od 1.01.1966 <i>Norma PN-74/B-02020</i> od 1.01.1976	1,16
1986-1992	<i>Norma PN-82/B-02020</i> od 1.01.1983	0,75
1993-2002	<i>Norma PN-91/B-20020</i> od 1.01.1992	0,55
2002-2008	Rozporządzenie; <i>Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie</i>	0,30
2009-2013		0,30
2014-2016		0,25
2017-2020		0,23
Od 2021		0,23
		0,20

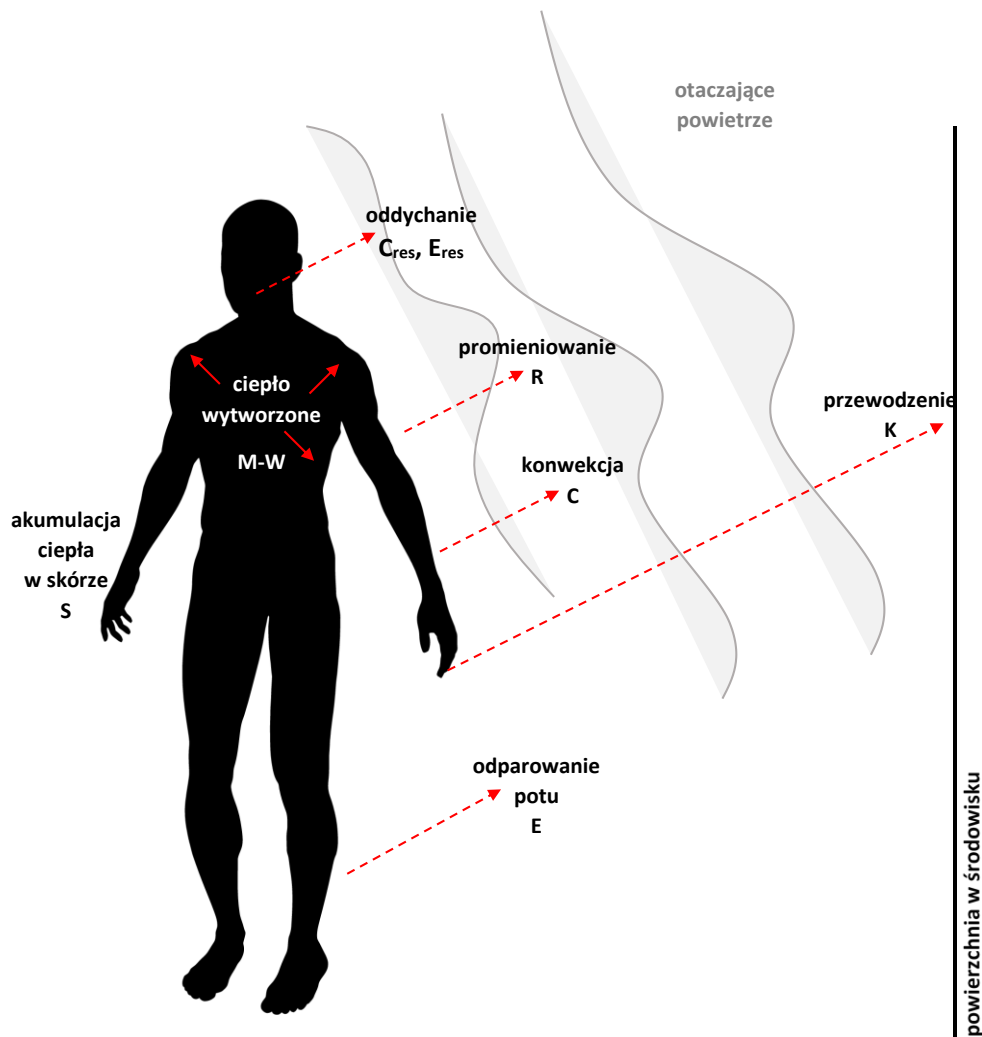
Na bazie powyższych wartości zauważyć można, że wymagania co do izolacyjności pionowych przegród zewnętrznych cały czas rosną [83]. Od 1966 roku, gdzie w *Prawie Budowlanym* [80] określono jego minimalną wartość na poziomie  $1,16\text{W/m}^2\cdot\text{K}$  , aż do wartości, obowiązującej od roku 2021, czyli do  $0,2\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ .

## 6. Komfort cieplny

Zadowolenie człowieka związane z parametrami powietrza panującymi w pomieszczeniu oraz z jego indywidualnymi odczuciami nazywane jest komfortem termicznym [84]. Stan komfortu występuje wówczas, gdy dana osoba nie odczuwa gorąca czy zimna, a panujące warunki są dla niej neutralne. Odczucia te odnoszą się do bilansu cieplnego organizmu człowieka, który jest zależny od metabolicznej produkcji ciepła, strat ciepła spowodowanych oddychaniem, jak i wymianą ciepła na drodze przewodzenia, konwekcji, promieniowania oraz parowania na drodze odprowadzenia potu z ciała, oraz oddychania (Rysunek 4) [84,85]. Jeśli bilans opisany równaniem (1) wynosi zero, to oznacza, że energia wytwarzana przez organizm człowieka w całości oddana jest do otoczenia, a w warunki w pomieszczeniu są komfortowe [85,86].

$$M - W = E + C + R + C_{res} + E_{res} + K + S \quad (1)$$





Rysunek 4 Bilans cieplny organizmu (opracowanie własne na podstawie [85,87])

Tempo metabolizmu ściśle związane jest z reakcjami chemicznymi zachodzącymi w organizmie człowieka. W zależności od indywidualnych uwarunkowań np. od wieku będzie następować z różną wartością. Dlatego, podczas analiz i badań komfortu termicznego należy mieć na uwadze indywidualne atrybuty danej osoby np. jej płeć, wiek, *BMI* [88]. Na tempo metabolizmu składa się mechaniczna praca organizmu i produkcja ciepła netto. Wzrost aktywności organizmu wiąże się ze wzrostem jego temperatury, a w celu utrzymania jej na poziomie około  $37^{\circ}\text{C}$  konieczne jest rozproszenie ciepła [89]. Największa ilość energii termicznej odprowadzana jest poprzez skórę, dlatego metabolizm wyraża się zazwyczaj w jednostce  $1\text{met}$ , co równe jest  $58\text{W}/\text{m}^2$  i oznacza wydzielaną przez organizm energię cieplną z  $1\text{m}^2$  powierzchni ciała [90]. Tempo metabolizmu można określić na podstawie tablic zamieszczonych w normie *PN-EN ISO 7730* [91], co przedstawia Tabela 6, wyznaczyć za pośrednictwem formuł zawartych w *ISO 8996* [92], bądź wykorzystać w tym celu metody

szacowania izolacyjności zawarte w załączniku do Standardu *ASHRAE 55* [87]. Należy przy tym zwrócić uwagę na ograniczenia zastosowania powyższych narzędzi.

Tabela 6 Wartości tempa metabolizmu według normy *PN-EN ISO 7730* [91]

Aktywność	Tempo metabolizmu	
	W/m <sup>2</sup>	met
Spoczynek w pozycji pólężącej	46	0,8
Spoczynek w pozycji siedzącej	58	1,0
Aktywność w pozycji siedzącej (biuro, miejsce zamieszkania, szkoła, laboratorium)	70	1,2
Mała aktywność w pozycji stojącej (robienie zakupów, laboratorium, lekki przemysł)	93	1,6
Średnia aktywność w pozycji stojącej (sprzedawca, prace domowe, obsługa lekkiej obrabiarki)	116	2,0
Chodzenie na poziomie terenu z prędkością:		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Pozostałe składowe bilansu cieplnego, czyli wymiana energii na podstawie przewodzenia, konwekcji, promieniowania oraz parowania, uzależnione są od parametrów środowiskowych i odzieży, którą ma na sobie respondent.

Ilość oraz jakość ubrań każdej osoby określana jest izolacyjnością, to jeden z indywidualnych parametrów mających wpływ na komfort cieplny. Izolacyjność odzieży wyrażana jest w jednostce *Iclo*. Przykładowe wartości zestawione są w normie *PN-EN ISO 7730* [91] i przedstawia je Tabela 7, a metody wykorzystywane do ich obliczania zawiera *PN-EN ISO 9920* [93] oraz Standard *ASHRAE 55* [87].

Proces wypromieniowania ciepła z organizmu odbywa się za pośrednictwem fal elektromagnetycznych w paśmie podczerwieni. Jego emisja zależna jest również od powierzchni ciała, im jest ona większa, tym więcej energii zostanie oddane do otoczenia. Wymiana energii na bazie przewodzenia ściśle wiąże się z bezpośrednim kontaktem z innym obiektem np. ścianą czy krzesłem. W przypadku ludzi jest to zazwyczaj tylko odsetek traconej przez organizm energii, z uwagi na odzież, która jest w tym układzie izolatorem. Konwekcja, czyli wymiana ciepła z powierzchni organizmu, w szczególności zależy od warunków środowiska, od różnicy temperatur między ciałem a powietrzem otoczenia, a także od prędkości i wilgotności powietrza. Utrata energii przez parowanie przebiega wtedy, gdy środowisko przestrzeni, w którym znajduje się człowiek, charakteryzuje się niższą prężnością pary wodnej w niej zawartej niż jej wartość na powierzchni skóry czy błon śluzowych dróg oddechowych.

Związane jest z tym uczucie duszności, które można zaobserwować, gdy odparowanie wody z organizmu jest utrudnione poprzez podwyższoną wilgotność i temperaturę powietrza. Takie warunki najczęściej spotykane są w obszarach tropikalnych, choć niejednokrotnie takie odczucia mogą również występować się w klimacie umiarkowanym [85,94]. Natomiast zbyt niski poziom wilgotności w pomieszczeniu może skutkować wysuszeniem się śluzówki w układzie oddechowym oraz powodować suchość skóry, a także bóle głowy [95].

Tabela 7 Izolacyjność cieplna odzieży według normy *PN-EN ISO 9920* [93]

Część odzieży		Jednostka clo
skarpety	lekkie	0,02
	grube do kostek	0,05
bielizna	biustonosz i majtki	0,03
	slipy	0,03
	nylonowe pończochy i rajstopy	0,03
	kalesony	0,10
	podkoszulek	0,04
	bluzka	0,09
	koszulka z rękawkami (T-shirt)	0,15
koszulka	lekka koszulka z długimi rękawkami	0,20
	typowa koszulka z długimi rękawkami	0,25
	flanelowa koszulka z długimi rękawkami	0,30
	lekka letnia spódnica	0,15
spódnica	gruba zimowa	0,25
	lekka sukienka z krótkimi rękawkami	0,20
sukienka	gruba zimowa sukienka z długimi rękawkami	0,40
	kombinezon	0,55
	kamizelka bez rękawów	0,12
sweter	cienki sweter	0,20
	sweter normalny	0,28
	gruby sweter	0,35
	szorty	0,06
spodnie	lekkie spodnie	0,20
	typowe spodnie	0,25
	flanelowe/bawełniane spodnie (zimowe)	0,28
	na cienkiej podszewie	0,02
obuwie	typowe	0,03
	na grubej podszewie	0,04

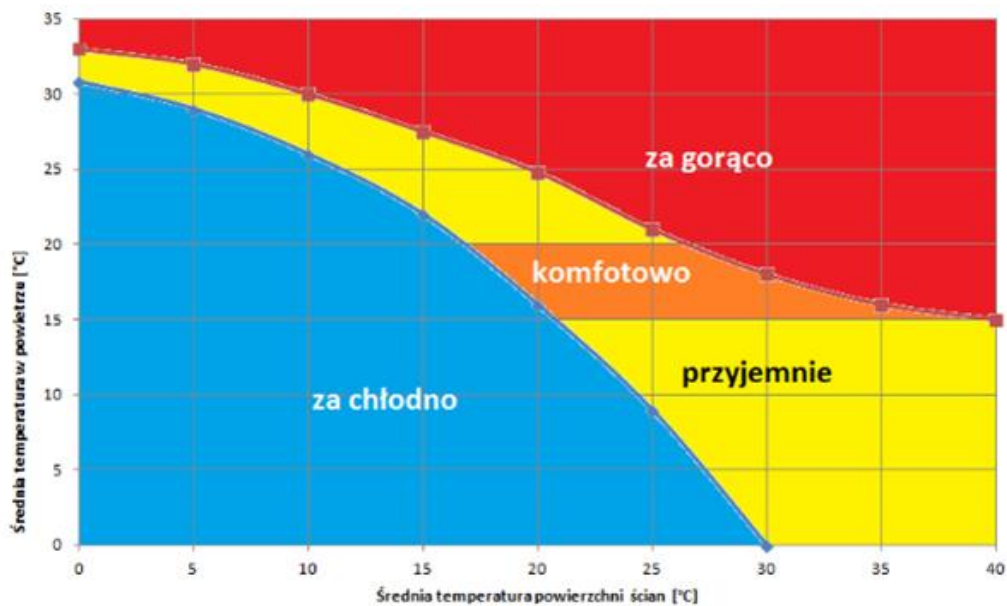
Komfort termiczny jest także jedną ze składowych jakości powietrza wewnętrznego (*IAQ*) [96], oba z nich uznano za istotne w kontekście użytkowania budynków [97]. Związane są z

nimi zarówno parametry fizyczne (m.in. temperatura, wilgotność względna, prędkość powietrza) oraz parametry chemiczne powietrza w pomieszczeniu (m.in. stężenie dwutlenku węgla czy pyłów zawieszonych [96,98]) .

Na komfort cieplny największy wpływ ma temperatura powietrza oraz promieniowania przegród. Relację między tymi parametrami oraz obszar komfortu przedstawia wykres Köeniga, Wykres 5. Można z niego odczytać, że warunki neutralne dla człowieka to takie, gdy średnia temperatura powietrza w pomieszczeniu mieści się między 15°C a 20°C przy jednoczesnym zachowaniu średniej temperatury powierzchni przegród w przedziale 22÷27°C [99].

Z komfortem cieplnym ściśle związane jest pojęcie dyskomfortu, które zostało szerzej opisane w normie *PN-EN ISO 7730* [91]. Dotyczy ono miejscowego wychłodzenia bądź zbytowego nagrzania części powierzchni ciała. Na indywidualne odczucia wpływ mogą mieć m.in. asymetria temperatury i prędkości powietrza w pomieszczeniu [64], a także temperatura otaczających przegród [91]. Pionowy gradient temperatury w strefie przebywania ludzi, jak wskazuje literatura [95], nie powinien przekraczać 10°C.

Prędkość powietrza w szczególności ma wpływ na temperaturę odczuwalną, im większa różnica pomiędzy temperaturą skóry a otoczenia, tym odczucie dyskomfortu jest większe. Ponadto, negatywne wrażenia cieplne mogą być powodowane lokalnymi przeciągami. W tym przypadku potęgowanie dyskomfortu związane jest także z temperaturą panującą w pomieszczeniu, przy wyższych jej wartościach podmuch powietrza może być odczuwany jako przyjemny, a gdy środowisko termiczne jest niekorzystne, ta sama prędkość może być już niekomfortowa [95].



Wykres 5 Zależność temperatury odczuwalnej od średniej temperatury powietrza i temperatury powierzchni przegród otaczających, wykres Kőeniga [99]

Komfort cieplny może być określany za pośrednictwem mierników [100]. Dotychczas zaproponowano ich przynajmniej kilkanaście. Należą do nich m.in. [101,102]:

- *PMV* i *PPD*,
- temperatura operatywna,
- temperatura ekwiwalentna,
- temperatura efektywna,
- temperatura komfortu,
- temperatura wynikowa.

W normie [91] odnaleźć można metody analitycznego wyznaczania wskaźników zaproponowanych przez P. O. Fanger'a dotyczących średniej oceny określonej liczby osób (*PMV*, *Predicted Mean Vote*) oraz przewidywanego odsetka osób niezadowolonych (*PPD*, *Predicted Percentage Dissatisfied*) stosowane dla środowiska umiarkowanego. Jest to podejście klasyczne poruszające tematykę komfortu cieplnego, a ustalenie wartości wskaźników odbywa się poprzez analizę związku między parametrami powietrza tj. temperaturą ( $T_a$ ), prędkością ( $V_{air}$ ), wilgotnością względną powietrza ( $RH_{air}$ ) a średnią temperaturą promieniowania ( $T_r$ ) oraz cechami indywidualnymi, czyli izolacyjnością odzieży ( $I_{cl}$ ) i aktywnością fizyczną [84].

Tabela 8 Skala odczuć termicznych wskaźnika *PMV* na podstawie normy *PN-EN ISO 7726* [91]

Wartość oceny	Odczucie
+3	Gorąco
+2	Ciepło
+1	Lekko ciepło
0	Neutralnie
-1	Lekko chłodno
-2	Chłodno
-3	Zimno

Wskaźnik *PMV* pozwala opisać wrażenia ciepłne człowieka na podstawie siedmiostopniowej skali odczuć termicznych, Tabela 8. Jego wartości wyznaczone są dla zerowego bilansu cieplnego człowieka poprzez jedną z poniższych metod zamieszczonych w normie *PN-EN ISO 7730* [91]:

- wykorzystanie równania (2)
- użycie programu komputerowego znajdującego się w załączniku E,
- wykonanie pomiarów bezpośrednich.

Przewidywaną średnią ocenę komfortu termicznego można wyznaczyć poprzez poniższe równanie i obliczenia jego poszczególnych składników:

$$\begin{aligned}
 PMV = & [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot [(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \\
 & \cdot (5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a) - 0,42[(M - W) - 58,15] \\
 & - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - T_a) \\
 & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \\
 & \cdot (T_{cl} - T_a)]
 \end{aligned} \quad (2)$$

,gdzie

$$\begin{aligned}
 T_{cl} = & 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot [3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 \\
 & - (T_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a)
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0,25} & \text{dla } 2,38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{V_{air}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{dla } 2,38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{U_{air}} \end{cases} \quad (4)$$

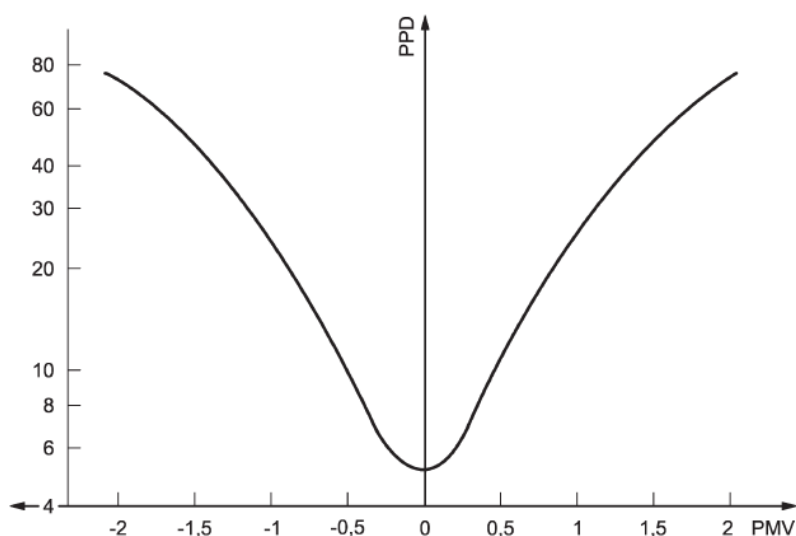
$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{dla } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{dla } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (5)$$

Kompleksowe urządzenia realizujące pomiary parametrów mikroklimatu bądź dołączone do nich oprogramowanie posiada wbudowane algorytmy do obliczeń wskaźników komfortu termicznego. Należy mieć na uwadze fakt, że powyższa norma [91] zaleca stosowanie wyliczeń średniej oceny określonej liczby osób dla jego wartości mieszczących się w zakresie  $<-2; 2>$  oraz przy założeniach:

- $M$  w zakresie od 0,8met do 4met,
- $I_{cl}$  w zakresie od 0clo do 2clo,
- $T_a$  w zakresie od 10°C do 30°C,
- $T_r$  w zakresie od 10°C do 40°C,
- $v_{air}$  w zakresie od 0m/s do 1m/s,
- $p_a$  w zakresie od 0Pa do 2 700Pa.

Ilościowe przewidywanie odsetka osób niezadowolonych w związku z panującymi warunkami termicznymi realizuje się za pośrednictwem wskaźnika  $PPD$ . Można go wyznaczyć za pośrednictwem równania (6) bądź na podstawie wykresu zamieszczonego w normie [91], który ukazuje zależność wskaźnika  $PPD$  w funkcji  $PMV$ , Wykres 6.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (6)$$



Wykres 6 Wskaźnik  $PPD$  w funkcji  $PMV$  [91]

Innym wyznacznikiem warunków komfortu jest temperatura operatywna (nazywana także temperaturą operacyjną) [103]. Wyznacza się ją na podstawie oddziaływania na człowieka temperatury powietrza otaczającego oraz średniej temperatury promieniowania. Jest to element tzw. podejścia adaptacyjnego, które dotyczy fizjologicznego, psychologicznego lub behawioralnego dostosowania się użytkowników do parametrów panujących w ich otoczeniu dążącego do uniknięcia dyskomfortu [104,105]. Metoda ta zakłada korelację między optymalną temperaturą komfortu a temperaturą operatywną w pomieszczeniach, uwzględnia także średnią kroczącą temperaturę powietrza zewnętrznego.

$$T_{op} = \frac{h_c \cdot T_a + h_r \cdot Tr}{h_c + h_r} \quad (7)$$

W adaptacyjnej teorii komfortu cieplnego można wyznaczyć także zakres temperatury komfortu, który pozwala zaaklimatyzować się większości użytkowników. Wartości minimalna i maksymalna wynosi  $\pm 2^\circ\text{C}$  od wartości wyznaczonej wg równania (8) (górną i dolną granicą komfortu) [106].

$$T_{comf} = 0,09 \cdot T_m + 22,6 \quad (8)$$

Na bazie norm *PN-EN ISO 7730* i *PN-EN 15251* [91,104] możliwe jest skategoryzowanie każdego budynku pod względem komfortu. Każda grupa posiada przypisany graniczny przedział wielkości wskaźnika *PMV* oraz *PPD*, co ukazuje Tabela 9.

Tabela 9 Kategorie budynków zgodne z normą *PN-EN 15251* [104]

Kategoria	Opis kategorii	wielkości graniczne <i>PMV</i>	<i>PPD</i>
I	Budynki nowe i specjalne. Wysoki poziom oczekiwań komfortu np. dzieci, osoby starsze, osoby niepełnosprawne.	$-0,2 < PMV < 0,2$	<6%
II	Budynki nowe i zmodernizowane. Normalny poziom oczekiwań.	$-0,5 < PMV < 0,5$	<10%
III	Budynki istniejące. Umiarkowany, akceptowalny poziom oczekiwań komfortu.	$-0,7 < PMV < 0,7$	<15%
IV	Obiekty nie zawierające się w poprzednich kategoriach. Akceptowalne warunki komfortu tylko dla określonych okresów roku.	$PMV < -0,7;$ lub $0,7 < PMV$	>15%



Innymi wskaźnikami pozwalającymi określić odczucia cieplne użytkowników są *TSV* (*Thermal Sensation Vote*) oraz *TPV* (*Thermal Preference Vote*) [107]. Określa się je na podstawie odpowiedzi respondentów za pośrednictwem wykonanych badań ankietowych. Podobnie jak w fangerowskim klasycznym podejściu do tematyki komfortu, do opisu *TSV* wykorzystywana jest siedmiostopniowa skala odczuć cieplnych. Natomiast wskaźnik *TPV* uzyskiwany jest poprzez odpowiedź na pytanie dotyczące preferowanych warunków w danym pomieszczeniu, „chciałabym/chciałbym, żeby było teraz zdecydowanie cieplej/ trochę cieplej/ bez zmian/ trochę chłodniej/ zdecydowanie chłodniej” [107].

## 7. Wpływ roślinności na aspekty życia człowieka

Miasta borykają się w wieloma problemami. Procesy komunalne i przemysłowe skutkują uwalnianiem ciepła i zanieczyszczeń do atmosfery, a gęsta tkanka dodatkowo wzmacnia kumulowanie się ich nad zabudowaniami oraz ogranicza roziewanie poza tereny zurbanizowane. Jest to niekorzystne dla mieszkańców z uwagi na to, że jakość i komfort życia w mieście wiążą się z parametrami powietrza. Dotyczy to zarówno, temperatury, wilgotności, a także stopnia zanieczyszczenia środowiska. Ponadto długotrwałe narażenie na powietrze zawierające zanieczyszczenia może mieć istotny wpływ na zdrowie, jak i samopoczucie człowieka oraz jego funkcje poznawcze [108]. Jest to aktualny problem, gdyż szacuje się, że do 2050 roku odsetek osób zamieszkałych na obszarach miejskich ma wzrosnąć do 68%, w 2020 roku było to 55% światowej populacji [109].

Jednym z elementów, które stosuje się w celu przeciwdziałania negatywnym skutkom zanieczyszczonego powietrza, a także polepszenia warunków życia w mieście jest roślinność. Na terenach zurbanizowanych jest ona wykorzystywana na wiele sposobów. Są to zarówno pojedyncze obiekty oraz całe obszary; sadi się drzewa, projektuje zielone ściany i dachy, roślinami pokrywa się ekrany akustyczne oraz przystanki. Badania [110] wskazują, że obecnie na 1 osobę przypada tylko 9m<sup>2</sup> powierzchni zielonej, natomiast optymalna jej ilość powinna wynosić około 50m<sup>2</sup>. Z uwagi na to, jak i podążając w myśl idei zrównoważonego rozwoju mieszkańcy oraz władze miast kładą coraz większy nacisk na zwiększenie powierzchni biologicznie czynnej.

W celu ograniczenia zużycia energii, podniesienia komfortu mieszkańców, jak i zminimalizowania zanieczyszczeń uwalnianych do atmosfery popularyzuje się *zielone budownictwo*. Żeby ocenić, czy dany obiekt może zostać zaliczony do grona takich budynków, wykonuje się ocenę wielokryterialną. Obecnie, certyfikacja w Polsce [111] obejmuje sześć

systemów: *LEED*, *BREEAM*, *WELL BUILDING STANDARD*, *HQE*, *DGNB* oraz *Zielony Dom*. Najbardziej rozpowszechnionym jest certyfikat *LEED*, w którym przyznaje się dodatkowe punkty za zastosowanie roślinności na ścianach i dachach.

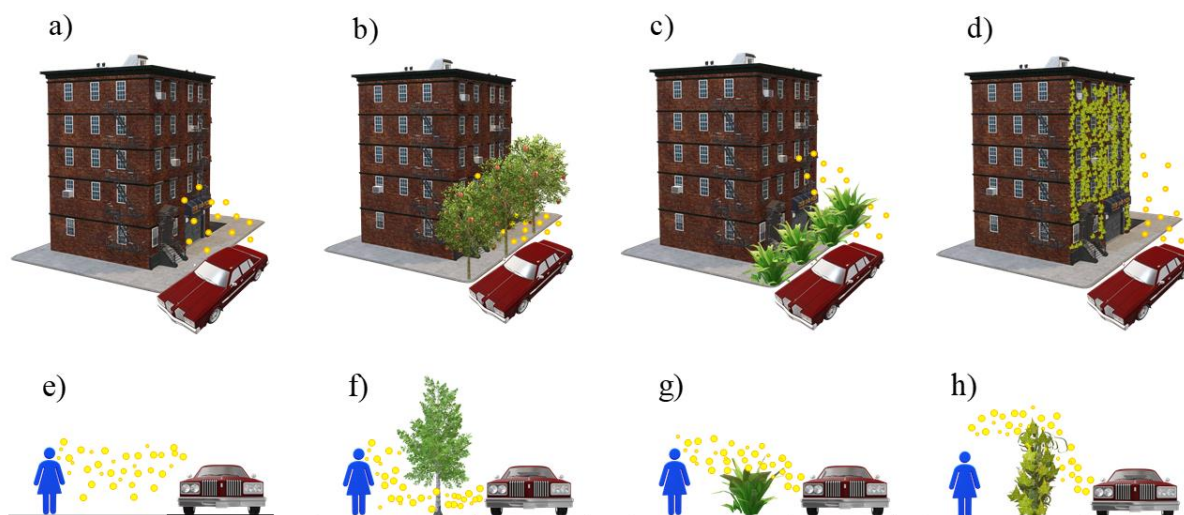
### **7.1. Wpływ roślinności na jakość powietrza**

Zanieczyszczenia powietrza są ogromnym zagrożeniem dla życia mieszkańców miast. Według badania *The Global Burden of Disease* w 2019 roku 4,51 mln zgonów spowodowanych było zanieczyszczeniem powietrza zewnętrznego [108,112]. Roślinność może pozytywnie wpływać na ich ograniczenie w środowisku poprzez szereg procesów chemicznych i fizycznych [49,113], do których należą:

- pochłanianie zanieczyszczeń gazowych przez aparaty szparkowe znajdujące się w liściach roślin,
- osiadanie i przyleganie cząstek stałych do powierzchni liści i gałęzi,
- pasywna akumulacja na systemie korzeniowo-glebowym rośliny.

Oprócz usuwania niechcianych związków, o czym wspomniano w punkcie 4.2 *Zalety i ograniczenia zielonych ścian* niniejszego opracowania, zieleń także produkuje niezbędny do życia tlen oraz ogranicza rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń. Dotyczy to także strumienia zanieczyszczeń drogowych [47], czyli efektów spalania paliw oraz unoszenia tych związków z powierzchni jezdni Rysunek 5.

W zależności od rodzaju roślinności i miejsca jej zastosowania, ograniczenie wpływu zanieczyszczeń na ludzi oraz budynki jest różne. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem w architekturze polskich miast są nasadzenia w obszarze jezdni wykonane z drzew, krzewów oraz trawniki. Występują one samodzielnie jak i w różnych konfiguracjach. Analizy [47] wskazują, że najmniej korzystnym rozwiązaniem z punktu widzenia ograniczenia oddziaływania zanieczyszczeń pochodzących z pojazdów mechanicznych na ludzi i budynki są drzewa. Jest to spowodowane tym, że ich korona, czyli „absorber”, najczęściej znajduje się na wysokości powyżej 2 metrów, co powoduje swobodny przepływ strumienia zanieczyszczeń poniżej tego poziomu. Natomiast, w połączeniu ich z krzewami przynoszą dużo lepszy efekt.



Rysunek 5 Rozprzestrzenianie się i wpływ zanieczyszczeń drogowych (opracowanie własne na podstawie [47])  
 a) na nieosłonięty budynek, b) budynek osłonięty drzewami, c) budynek osłonięty krzewami, d) budynek osłonięty roślinnością,  
 e) nieosłoniętych pieszych, f) pieszych osłoniętych drzewami, g) pieszych osłoniętych krzewami, pieszych osłoniętych ekranami z roślinności

Przeprowadzone analizy [47] wykazały także, że najlepszy rezultat dotyczący redukcji zanieczyszczeń osiąga zielona ściana. Redukcja zanieczyszczeń wynosi aż 95% w odniesieniu do scenariusza, w którym roślinność nie występuje. Efektywne jest zarówno zastosowanie zieleni na budynkach, jak i w formie barier między ciągiem komunikacyjnym a miejscami przebywania ludzi.

Istotne znaczenie na jakość powietrza w mieście mają także inne czynniki, jak wilgotność względna, temperatura powietrza oraz prędkość i kierunek wiatru, co zostało opisane w publikacji [36], która przywołuje również inne badania [114–117].

## 7.2. Wpływ zielonych ścian na komfort człowieka

Komfort jest złożonym zagadnieniem, a na jego odczucie wpływ ma wiele bodźców. Należą do nich m.in. parametry powietrza, które odpowiadają za nastrój i samopoczucie użytkowników, a także za komfort termiczny [118,119]. Na komfort akustyczny natomiast wpływają hałas, szумы i inne dźwięki, z kolei warunki oświetlenia związane są z komfortem wizualnym.

Jak wspomniano w rozdziale 6 *Komfort cieplny*, odczucia komfortu cieplnego uwarunkowane są parametrami powietrza w pomieszczeniu, jak i innych otaczających przegród. Na temperaturę powierzchni ścian mają wpływ ich parametry cieplne wynikające z konstrukcji i materiałów, z których są wykonane. Zielone ściany są swego rodzaju materiałem izolacyjnym. W okresie letnim, za pośrednictwem roślinności zastosowanej na przegrodach,

następuje obniżenie temperatury wskutek pochłaniania, jak i odbijania promieniowania słonecznego z powierzchni roślin. Istotnym parametrem jest albedo [120], czyli stosunek ilości promieniowania, które jest odbijane od powierzchni danego materiału do ilości promieniowania na nie padającego. Materiały wykończeniowe fasad budynków posiadają zazwyczaj niższe albedo od liści, dlatego latem ściana pokryta roślinnością mniej się nagrzewa. Natomiast w okresie zimnym zastosowanie roślin zimozielonych zmniejsza wpływ warunków zewnętrznych na parametry przegrody i ich transport wewnątrz.

Istnieje także bezpośredni związek wilgotności względnej powietrza i odczuciem komfortu termicznego. Z uwagi na to, że roślinność absorbuje wilgoć w najbliższym otoczeniu, spodziewać się można jej wzrostu w powietrzu. Ma to miejsce także w przypadku większej skali, gdzie obszar biologicznie czynny zostanie zwiększony w tkance miejskiej.

Zielone ściany, jak wspomniano w poprzednich akapitach (Rozdział 4.2 *Zalety i ograniczenia zielonych ścian*), mogą przyczynić się do zmiany odczuć cieplnych. W tym celu prowadzono badania w warunkach rzeczywistych, prowadzono testy w pomieszczeniach oraz modelowano oddziaływanie roślinności porastającej budynek. Wyniki analiz z innych krajów zestawiono w literaturze [121–125], jednak nie odnaleziono literatury bazującej na warunkach klimatu umiarkowanego ciepłego przejściowego w Polsce.

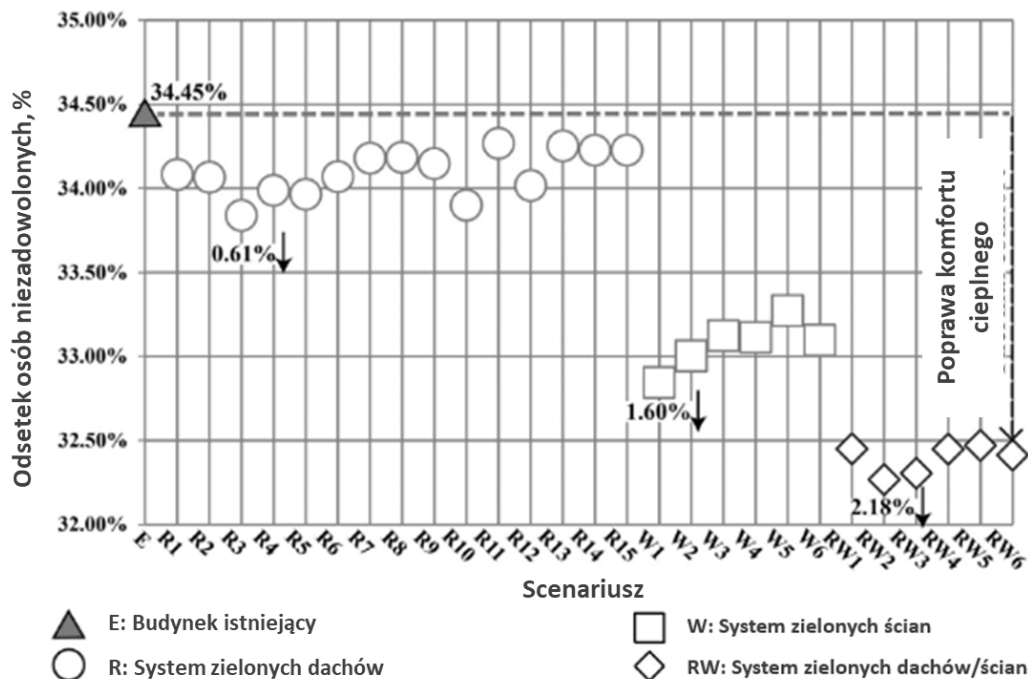
W literaturze odnaleźć można opis standardowych rozwiązań dotyczących zastosowania roślinności na przegrodach budynków. Wpływ na komfort termiczny 27-u najpopularniejszych systemów stosowanych na budynkach, które przedstawia Tabela 10, zamodelowano w okresie całorocznym w oprogramowaniu *Energy Plus* [126]. Symulacje wykonane przez badaczy dotyczyły obiektu zlokalizowanego w Incheon w pobliżu Seulu i obejmowały okres od 1.01.2014 do 21.12.2014. Wyniki przedstawiono w postaci wskaźnika dyskomfortu *PPD* osób znajdujących się w budynku, co ukazuje Wykres 7. Na jego podstawie można zaobserwować spadek odsetka osób niezadowolonych z warunków termicznych dla każdego z zamodelowanych scenariuszy.

Tabela 10 Standardowe scenariusze projektowe dotyczące zastosowania roślinności na przegrodach budynków [126] (tłumaczenie własne)

Miejsce instalacji	Typ gleby	Rodzaj roślinności	Nazwa scenariusza
Dach	Sztuczna gleba*	Sukulenty	R1
		Trawa	R2
		Niski krzew	R3
		Krzewy	R4
		Drzewa	R5
	Użyźniona gleba	Sukulenty	R6
		Trawa	R7
		Niski krzew	R8
		Krzewy	R9
		Drzewa	R10
	Naturalna gleba	Sukulenty	R11
		Trawa	R12
		Niski krzew	R13
		Krzewy	R14
		Drzewa	R15
Ściana	Sztuczna gleba	Sukulenty	W1
		Trawa	W2
	Użyźniona gleba	Sukulenty	W3
		Trawa	W4
	Naturalna gleba	Sukulenty	W5
		Trawa	W6
Dach/Ściana	Sztuczna gleba	Sukulenty	RW1
		Trawa	RW2
	Użyźniona gleba	Sukulenty	RW3
		Trawa	RW4
	Naturalna gleba	Sukulenty	RW5
		Trawa	RW6

\* jej skład mogą wchodzić m.in. torf, gleba ziarnista, osady ściekowe, szlam [127]

Najbardziej efektywne rozwiązania pod kątem pozytywnego wpływu na odczucia cieplne są te składające się z zastosowania na budynku zielonej ściany oraz zielonego dachu. Dla tych rozwiązań wskaźnik *PPD* spadł o ponad 2% w odniesieniu do wrażeń termicznych w budynku istniejącym, Wykres 7.



Wykres 7 Wartość wskaźnika odsetka osób niezadowolonych z warunków termicznych zamodelowana dla okresu całorocznego w przypadku budynku istniejącego oraz najpopularniejszych systemów zastosowania roślin na tym samym obiekcie [126] (tłumaczenie własne)

Inna literatura [122] potwierdza, że roślinność zastosowana w obszarze miejskim, w tym zielone ściany oraz dachy, również oddziałują pozytywnie na komfort mieszkańców podczas ich przebywania na zewnątrz i na ich jakość życia. Wpływ na to mają m.in. ich zdolność do redukcji temperatury w okresie letnim czy redukcja hałasu.

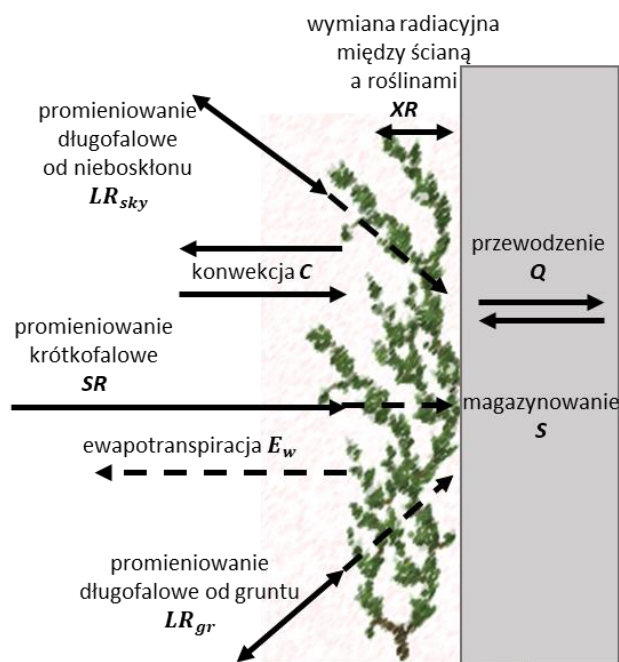
## 8. Wymiana ciepła i masy w przegrodzie

Opisanie zjawisk transportu ciepła i masy możliwe jest przy zastosowaniu modeli matematycznych. W literaturze odnaleźć można ich wiele. Jednakże warto podkreślić, że nie wszystkie z nich są przeznaczone do tego samego rodzaju przegród budowlanych. W szczególności dotyczy to ścian i dachów z roślinnością. Z uwagi na zróżnicowany sposób wymiany ciepła przez zazielenioną przegrodę pionową i zielony dach, ich modele nie są tożsame i nie mogą być stosowane zamiennie. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż zdecydowanie mniej dostępnych jest modeli matematycznych opisujących równocześnie wymianę ciepła i masy dla zielonych ścian. Opracowania obejmujące zagadnienia termiczno-wilgotnościowe w większości opublikowane zostały w ostatnich latach [128,129]. Może to świadczyć o dużej złożoności przedstawianych procesów.

## 8.1. Model termiczny

Proste procesy wymiany ciepła następują wskutek różnicy temperatur ośrodków. Natomiast w przypadku wymiany między dwoma ośrodkami, pomiędzy którymi znajduje się przegroda budowlana, proces ten jest bardziej złożony. Składa się z: przejmowania ciepła na drodze konwekcji i promieniowania, przewodzenia stykających się powierzchni oraz przejmowania ciepła [130].

Roślinność stosowaną na ścianie uznaje się za niekonwencjonalny rodzaj izolacji termicznej, który wpływać może na obniżenie współczynnika przenikania ciepła. W celu opisanego wymiany ciepła przez zieloną ścianę stworzono modele matematyczne, które dostępne są m.in. w literaturze [10–16]. Na podstawie właściwości fizjologicznych roślin, takich jak np. wskaźnik powierzchni liścia, średni wymiar i chłonność liścia oraz uwzględniając parametry otoczenia m.in. temperaturę powietrza, temperaturę powierzchni ściany, natężenie promieniowania słonecznego czy prędkość powietrza, możliwe jest opisanie tego procesu. Modele tego typu zawierają również inne istotne elementy w kontekście określenia wymiany ciepła przez zazielenioną przegrodę, czyli m.in. proces ewapotranspiracji ( $E_w$ ), wymiany radiacyjnej między roślinami a ścianą ( $XR$ ), co przedstawia Rysunek 6. Natomiast z uwagi na złożoność procesów biofizycznych roślin modele te są trudne do opracowania i wymagają pewnych założeń, co powoduje, że nie zawsze mogą sprawdzać się w danych warunkach.



Rysunek 6 Składowe bilansu ciepła dla ściany z roślinnością (opracowanie własne na podstawie [13])

Równania w modelach opisujących wymianę ciepła w przypadku zastosowania zielonych fasad oraz żyjących ścian różnią się od siebie. Różnice dotyczą m.in. liczby uwzględnianych parametrów w przypadku roślinności na ścianie.

W publikacji [13] opisany został model transportu ciepła dla zielonej fasady. Jest to dotychczas najbardziej szczegółowe opracowanie obejmujące transport ciepła przez przegrodę z roślinnością. Opisujące go równania uwzględniają m.in. cechy roślinności, charakterystyczne parametry przegrody, a także właściwości powietrza zewnętrznego.

Matematyczne zaprezentowanie wymiany ciepła przez przegrodę z bezpośrednią zieloną fasadą zawarte w publikacji [13], wywodzi się z równania (9) (poszczególne człony równania opisane zostały za pośrednictwem wzorów (10)-(32) zawartych w publikacji [13]) opisującego bilans energetyczny ściany porośniętej roślinnością opisany indeksem  $v_w$ .

$$SR_{vw} + LR_{vw} + XR + C_{vw} = Q_{vw} + S_{vw} \quad (9)$$

W równaniu uwzględnione zostały: słoneczne promieniowanie krótkofalowe ( $SR$ ) i długofalowe ( $LR$ ), wymiana promieniowania między warstwą roślinną a powierzchnią ściany zewnętrznej ( $XR$ ), wymiana ciepła między powietrzem zewnętrznym a ścianą ( $C$ ), energia transportowana przez ścianę ( $Q$ ) oraz w niej akumulowana ( $S$ ). Każdy z członów uwzględnionych w równaniu obliczony został na podstawie poszczególnych parametrów opisujących warstwę roślinności oraz przegrodę, na której została zaimplementowana.

Padające na ścianę promieniowanie krótkofalowe wyznaczone zostało na podstawie całkowitego natężenia promieniowania słonecznego padającego na fasadę budynku ( $I_t$ ) z uwzględnieniem absorpcji energii przez nieosłoniętą ścianę ( $\alpha_{wall}$ ) oraz przepuszczalności promieniowania przez warstwę roślin ( $\tau$ ).

$$SR_{vw} = I_t \cdot \alpha_{wall} \cdot \tau \quad (10)$$

Zależność między  $LAI$  a współczynnikiem tłumienia przez roślinność ( $\kappa$ ) opracowana przez Monsi i Saeki w 1953r. pozwala wyznaczyć współczynnik  $\tau$ .

$$\tau = \exp(-\kappa \cdot LAI) \quad (11)$$

Promieniowanie długofalowe wyznaczono na podstawie sumy iloczynów parametrów związanych z emisją energii do ściany od gruntu i nieba, co przedstawiono na równaniu (12).



Obliczenia wykonano poprzez uwzględnienie przepuszczalności promieniowania przez warstwę roślin, emisyjności promieniowania długofalowego przez niebo ( $\varepsilon_{sky}$ ), przegrodę ( $\varepsilon_{wall}$ ) i grunt ( $\varepsilon_{gr}$ ), współczynników pomiędzy obiektami i źródłami promieniowania długofalowego opisującego grunt ( $F_{gr}$ ) i niebo ( $F_{sky}$ ), temperatury gruntu ( $T_{gr}$ ), temperatury czystego nieba ( $T_{sky}$ ), temperatury powierzchni przegrody za warstwą roślinności ( $T_{svw}$ ) oraz stałej Stefana-Boltzmana ( $\sigma$ ).

$$LR_{vw} = \tau \cdot \varepsilon_{sky} \cdot \sigma \cdot F_{sky} \cdot (T_{sky}^4 - T_{svw}^4) + \tau \cdot \varepsilon_{wall} \cdot \varepsilon_{gr} \cdot \sigma \cdot F_{gr} \cdot (T_{gr}^4 - T_{svw}^4) \quad (12)$$

Wymiana radiacyjna pomiędzy warstwą roślinną a ścianą budynku określana została na podstawie zależności uwzględniającej emisyjność promieniowania długofalowego przez warstwę roślin ( $\varepsilon_{leaf}$ ) i ścianę, stałą Stefana-Boltzmana oraz przepuszczalność promieniowania przez roślinność, a także temperatury powierzchni przegrody za zieloną ścianą i temperatury powierzchni liścia ( $T_{leaf}$ ).

$$XR = (1 - \tau) \cdot \frac{\varepsilon_{leaf} \cdot \varepsilon_{wall} \cdot \sigma}{(\varepsilon_{leaf} + \varepsilon_{wall} - \varepsilon_{leaf} \cdot \varepsilon_{wall})} \cdot (T_{svw}^4 - T_{leaf}^4) \quad (13)$$

Wymiana ciepła między powietrzem zewnętrznym a ścianą za pośrednictwem konwekcji obliczono poprzez iloczyn współczynnika przenikania ciepła konwekcyjnego powierzchni przegrody z roślinnością ( $h_{vw}$ ) oraz różnicy temperatury powietrza zewnętrznego ( $T_{air}$ ) i powierzchni przegrody za warstwą zieleni.

$$C_{vw} = h_{vw} \cdot (T_{air} - T_{svw}) \quad (14)$$

Współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła przegrody obliczono z wartości prędkości powietrza zewnętrznego.

$$h_{vw} = 10,79 + 4,19 \cdot V_{air} \quad (15)$$

Wyznaczono go podobnie jak dla przegrody bez roślinności (40). Literatura [13] wskazuje, że założenie to powinno być zweryfikowane.

Całkowity strumień ciepła przepływający przez przegrodę z roślinnością, opisano poprzez stosunek różnicy temperatury powierzchni przegrody za warstwą roślinności oraz temperatury powietrza w pomieszczeniu ( $T_{in}$ ) do oporu cieplnego przegrody zewnętrznej ( $R_{bw}$ ).

$$Q_{vw} = \frac{T_{svw} - T_{in}}{R_{bw}} \quad (16)$$

Ciepło zmagazynowane w materiałach tworzących przegrodę określone zostało na podstawie iloczynu jej grubości ( $L$ ), ciepła właściwego ( $c_{pwall}$ ), gęstości materiału ( $\rho$ ) oraz zmiany temperatury powierzchni przegrody za warstwą roślinności w określonym czasie ( $t$ ).

$$S_{vw} = L \cdot c_{pwall} \cdot \rho \cdot \left(\frac{dT_{svw}}{dt}\right) \quad (17)$$

Składniki powyższych równań wyznaczone zostały poprzez uwzględnienie pozostałych danych dotyczących przegrody oraz roślinności na niej zastosowanej.

Opór cieplny przegrody zewnętrznej wraz z roślinnością ( $R_{vw}$ ) określono na podstawie stosunku ilorazu różnicy temperatury zewnętrznej powierzchni przegrody ( $T_{sbw}$ ) i temperatury w pomieszczeniu do całkowitego strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę z roślinnością.

$$R_{vw} = R_{bw} \cdot \frac{Q_{bw}}{Q_{vw}} = \frac{T_{sbw} - T_{in}}{Q_{vw}} \quad (18)$$

Natomiast różnica między oporem cieplnym przegrody zewnętrznej wraz z roślinnością a oporem cieplnym przegrody zewnętrznej stanowi oporność termiczną samej warstwy roślinnej ( $R_{plant}$ ).

$$R_{plant} = R_{vw} - R_{bw} \quad (19)$$

Wskazano, że liście pnączy, z których wykonuje się zieloną fasadę, zazwyczaj prezentują się jako cienka i płaska płytką [13,131]. Każdy liść charakteryzuje wymiana ciepła za pośrednictwem radiacji i konwekcji z otaczającym powietrzem oraz odparowanie wody z powierzchni (ewapotranspiracja). W przypadku przewodzenia ciepła mowa jest o nieistotnej wartości. Temperatura powierzchni liścia określona została na podstawie analiz Campbella

[132]. Uwzględniała ona temperaturę powietrza otaczającego, pozorną stałą termodynamiczną ( $\gamma'$ ), ciśnienie atmosferyczne ( $P_{air}$ ), nachylenie funkcji ciśnienia pary nasyconej ( $\Delta$ ), promieniowanie pochłonięte przez zieloną ścianę ( $Q_{leaf}$ ), ciepło właściwe powietrza przy danym ciśnieniu ( $c_{pair}$ ), przewodność cieplna powietrza ( $g_c$ ), ciśnienie pary wodnej nasyconej w zależności od temperatury ( $e_s$ ) oraz parcjalne ciśnienie pary wodnej ( $e_a$ ).

$$T_{leaf} = T_{air} + \frac{\gamma'}{\frac{\Delta}{P_{air}} + \gamma'} \cdot \left[ \frac{Q_{leaf}}{g_c \cdot c_{pair}} - \frac{(e_s(T_{air})) - e_a}{P_{air} \cdot \gamma'} \right] \quad (20)$$

Pozorna stała termodynamiczna określana została na podstawie stałej termodynamicznej ( $\gamma$ ), przewodności cieplnej i pary wodnej przez powietrze ( $g_v$ ).

$$\gamma' = \frac{\gamma \cdot g_c}{g_v} \quad (21)$$

Przewodność cieplna powietrza jest wynikiem zsumowania przewodnictwa radiacyjnego ( $g$ ) oraz przewodnością warstwy granicznej dla wymiany ciepła przez powietrze ( $g_{bh}$ )

$$g = g_v + g_{bh} \quad (22)$$

Do wyznaczenia przewodności warstwy granicznej dla wymiany ciepła przez powietrze i dla pary wodnej ( $g_{bv}$ ) zastosowano zależność między prędkością powietrza ( $V_{air}$ ) a grubością warstwy roślinnej ( $D$ ).

$$g_{bh} = 1,4 \cdot \left( 0,135 \cdot \sqrt{\frac{V_{air}}{D}} \right) \quad (23)$$

$$g_{bv} = 1,4 \cdot \left( 0,147 \cdot \sqrt{\frac{V_{air}}{D}} \right) \quad (24)$$

Natomiast przewodność pary wodnej przez powietrze ( $g_v$ ) wyznaczono za pośrednictwem wyznaczonej rzeczywistej przewodności aparatów szparkowych dolnej ( $g_{asll}$ ) i górnej ( $g_{asul}$ ) powierzchni liścia oraz wartość przewodnictwa warstwy granicznej dla pary wodnej.

$$g_v = \frac{0,5 \cdot g_{asul} \cdot g_{bv}}{g_{asul} + g_{bv}} + \frac{0,5 \cdot g_{asll} \cdot g_{bv}}{g_{asll} + g_{bv}} \quad (25)$$

Nachylenie funkcji ciśnienia pary nasyconej określono za pośrednictwem ciśnienia pary wodnej nasyconej w zależności od temperatury oraz temperatury powietrza.

$$\Delta = \frac{4217 \cdot e_s(T_{air})}{(240,97 + T_{air})^2} \quad (26)$$

Uwzględniając natężenie promieniowania słonecznego, emisyjność promieniowania długofalowego przez warstwę roślin, współczynnik absorpcji promieniowania przez przegrodę ( $\alpha_{leaf}$ ), współczynnik pomiędzy obiektami i źródłami promieniowania długofalowego ( $F$ ), temperatury gruntu, powietrza i czystego nieba oraz stałą Stefana-Boltzmann, określono całkowite promieniowanie pochłanianie przez roślinność, z której złożona była zielona fasada.

$$Q_{leaf} = I_t \cdot \alpha_{leaf} + \varepsilon_{leaf} \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_{sky}^4 + T_{gr}^4) - \varepsilon_{leaf} \cdot \sigma \cdot (T_{air})^4 \quad (27)$$

Ciśnienie pary wodnej powietrza w stanie nasycenia oraz ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu wyznaczono na bazie wilgotności względnej powietrza zewnętrznego ( $RH_{air}$ ) oraz jego temperatury.

$$e_s(T_{air}) = 0,611 \cdot \exp \frac{17,502 \cdot T_{air}}{(T_{air} + 240,97)} \quad (28)$$

$$e_a = e_s(T_{air}) \cdot RH_{air} \quad (29)$$

Z zależności Straube'a i Burnetta wyznaczono temperaturę czystego nieba. W obliczeniach uwzględniono temperaturę powietrza oraz temperatury punktu rosy ( $T_{dewpoint}$ ).

$$T_{sky} = T_{air} \cdot \left[ 0,8 + \frac{(T_{dewpoint} - 273)}{250} \right]^{0,25} \quad (30)$$

Wskaźniki opisujące promieniowanie długofalowe dla gruntu oraz nieba obliczono poprzez zastosowanie funkcji trygonometrycznych odnoszących się do kąta nachylenia powierzchni przegrody ( $\theta$ ).

$$F_{gr} = 0,5 \cdot (1 - \cos\theta) \quad (31)$$

$$F_{sky} = 0,5 \cdot (1 - \cos\theta) \quad (32)$$

Powyższy model zakłada, że roślinność ma niewielki wpływ, gdy temperatura zewnętrzna jest niższa niż temperatura w pomieszczeniu. Związane jest to z odwróconym kierunkiem przepływu ciepła. Podczas tego procesu model zakłada, że wartość oporu cieplnego roślin ( $R_{plant}$ ) wynosi  $0m^2 \cdot K/W$ . [13]

Równania (33)÷(40) zawarte w publikacji [13] opisujące bilans energetyczny ściany bez roślinności (indeks bw) nie uwzględniają parametrów związanych z zieloną fasadą:

$$SR_{bw} + LR_{bw} + C_{bw} = Q_{bw} + S_{bw} \quad (33)$$

Uwzględniono w nich słoneczne promieniowanie krótkofalowe ( $SR_{bw}$ ) i długofalowe ( $LR_{bw}$ ), wymianę ciepła między powietrzem zewnętrznym a ścianą ( $C_{bw}$ ), energię transportowaną ( $Q_{bw}$ ) oraz akumulowaną w przegrodzie ( $S_{bw}$ ).

Wartość promieniowania krótkofalowego docierającego do zewnętrznej powierzchni ściany obliczona zostało na podstawie całkowitego natężenia promieniowania słonecznego padającego na fasadę budynku z uwzględnieniem energii przez nią zaabsorbowanej.

$$SR_{bw} = I_t \cdot \alpha_{wall} \quad (34)$$

Podobnie jak w przypadku fasady z roślinnością, promieniowanie długofalowe wyznaczono na podstawie sumy iloczynów parametrów związanych z emisją energii do ściany od gruntu i nieba pomijając jedynie przepuszczalność promieniowania przez warstwę roślin.

$$LR_{bw} = \varepsilon_{wall} \cdot \varepsilon_{sky} \cdot \sigma \cdot F_{sky} \cdot (T_{sky}^4 - T_{sbw}^4) + \varepsilon_{wall} \cdot \varepsilon_{gr} \cdot \sigma \cdot F_{gr} \cdot (T_{gr}^4 - T_{sbw}^4) \quad (35)$$

Konwekcyjna wymiana ciepła dla ściany zewnętrznej wynika z zależności współczynnika przenikania ciepła konwekcyjnego powierzchni przegrody i różnicy temperatury powietrza zewnętrznego oraz powierzchni przegrody.

$$C_{bw} = h_{bw} \cdot (T_{air} - T_{sbw}) \quad (36)$$

Strumień ciepła przepływający przez przegrodę wyznaczono poprzez uwzględnienie temperatury powierzchni przegrody, temperatury powietrza w pomieszczeniu oraz oporu cieplnego ściany.

$$Q_{bw} = \frac{T_{sbw} - T_{in}}{R_{bw}} \quad (37)$$

Grubość poszczególnych warstw przegrody, ciepło właściwe, gęstości materiałów oraz zmiany temperatury powierzchni przegrody w określonym czasie pozwoliły na określenie ciepła zmagazynowanego w ścianie. Warto podkreślić, że ciepło, które pochłanianie przez ścianę wędruje w jej głąb z pewnym opóźnieniem zależnym od pojemności cieplnej danego materiału budowlanego.

$$S_{bw} = L \cdot c_{pwall} \cdot \rho \cdot \left(\frac{dT_{sbw}}{dt}\right) \quad (38)$$

Natomiast opór cieplny przegrody wyznaczono na podstawie różnicy temperatury zewnętrznej powierzchni ściany i temperatury w pomieszczeniu oraz całkowitego strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę.

$$R_{bw} = \frac{T_{sbw} - T_{in}}{Q_{bw}} \quad (39)$$

Współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła przegrody obliczono z uwzględnieniem prędkości powietrza zewnętrznego.

$$h_{bw} = 10,79 + 4,19 \cdot V_{air} \quad (40)$$

Schemat obliczeń oraz listę danych wejściowych do modelu zawartego w publikacji [13] zawiera Rysunek 7. Niezbędne do wprowadzenia parametry podzielono na te, które dotyczą powietrza zewnętrznego, gruntu, roślinności, opisujące przegrodę oraz warunki powietrza wewnątrz budynku. Na ich podstawie wykonano obliczenia poszczególnych wyrażień, uwzględniono je w bilansie oraz wyznaczono ilość transportowanego ciepła. Weryfikację modelu matematycznego [13] wykonano za pośrednictwem danych pomierzonych w okresie letnim w czasie 3 dni pomiarowych (29.08.2012 do 1.09.2012) w Chicago w stanie Illinois, USA oraz zamodelowanych. Na tym obszarze klimat określa się jako umiarkowany zimny. Pomiary parametrów mierzono około 5m od powierzchni gruntu. Natomiast pomieszczenie, które znajdowało się za ścianą pokrytą roślinnością, było klimatyzowanym pokojem biurowym [13]. Niektóre z parametrów przyjęto, bazując na danych literaturowych. Natomiast zamodelowano m.in. natężenie promieniowania słonecznego padającego na fasadę budynku, gdyż mierzono globalne natężenie promieniowania [13].





## 8.2. Model termiczno-wilgotnościowy

Równocześnie z transportem ciepła przez przegrodę następuje także wymiana masy. Obecność wilgoci w materiałach porowatych obniża ich opór cieplny. W odróżnieniu od opisu przepływu energii cieplnej transport masy jest bardziej skomplikowany oraz wymaga złożonych i sprzężonych równań.

### *Model sprzężonego transportu ciepła i wilgoci przez zieloną fasadę*

Model matematyczny sprzężonego transportu ciepła i wilgoci w przypadku przegrody z zieloną fasadą opisany został w artykule [128] i składa się z zestawu trzech sprzężonych nieliniowych równań różniczkowych (41)(42)(43) uwzględniających przepływ ciepła przez warstwę roślinną, jak i transport ciepła oraz masy przez powietrze otaczające zieloną ścianę. Uwzględniają one w szczególności temperaturę roślin, powietrza oraz ciśnienia pary wodnej w ich otoczeniu. Ponadto opisują akumulację energii termicznej w warstwie biologicznie czynnej, a także ciepło i wilgoć w powietrzu ją okalającą wykorzystując przy tym procesy: konwekcji, promieniowania krótko i długofalowego oraz transpiracji. Model został przekształcony z modelu opisującego wymianę ciepła i masy przez dach zielony.

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{p\text{air}} \cdot D_{\text{leaf}} \cdot LAI \cdot \frac{dT_{\text{leaf}}}{dt} = q_p^{rs} + q_{\text{sky-p}}^{rl} + q_{\text{gro-p}}^{rl} + q_{\text{sw-p}}^{rl} + q_{\text{ca-p}}^{conv} + q_{\text{a-p}}^{conv} + q_{\text{p-ca}}^{trans} \quad (41) \\ c_{p\text{ca}} \cdot D \cdot \frac{dT_{\text{ca}}}{dt} = q_{\text{sw-ca}}^{conv} + q_{\text{a-ca}}^{conv} + q_{\text{p-ca}}^{conv} \quad (42) \\ \rho_{\text{ca}} \cdot D \cdot \theta_p \cdot \frac{dp_{\text{v,ca}}}{dt} = j_{\text{v,p-ca}}^{trans} + j_{\text{v,sw-ca}}^{conv} + j_{\text{v,a-ca}}^{conv} \quad (43) \end{array} \right.$$

Zieloną ścianę, ze względu na zastosowane w niej rośliny liściaste, przyjmuje się jako niejednorodną warstwę, w której przepływ powietrza jest turbulentny. Z uwagi na praktycznie niemożliwy opis fizyczny zjawiska hydrotermicznego w warstwie roślinności potraktowano ją jako jednorodną ograniczoną z obu stron przestrzeń o określonych parametrach. W celu opisanie wymiany ciepła i masy przez przegrodę z roślinnością niezbędne było zastosowanie modelu Newtona oraz prawa Stefana-Boltzmana [128]. Ponadto w obszarze zielonej ściany zjawiska przepływu mogą być traktowane jako niewymiarowe liczby np. Reynoldsa, Grashoffa czy Prandtla.

### Model hydrotermiczny żyjącej ściany

Model opracowany przez Malys i in. autorów [15] został opisany poprzez szereg równań. Mikroklimat miejski symulowany został w oprogramowaniu *SOLENE-Microclimate* oraz zwalidowany doświadczalnie w warunkach klimatu umiarkowanego.

Ewapotranspiracja została wyznaczona na podstawie równania (44), które uwzględnia m.in. bilans promieniowania netto ( $R_n$ ) jak i właściwości powietrza zewnętrznego.

$$E_w = \frac{R_n \Delta + \rho_{air} \cdot c_{p_{air}} \cdot \frac{e_s - e_a}{r_a}}{h_v \cdot (\Delta + \gamma \cdot (1 + \frac{r_s}{r_a}))} \quad (44)$$

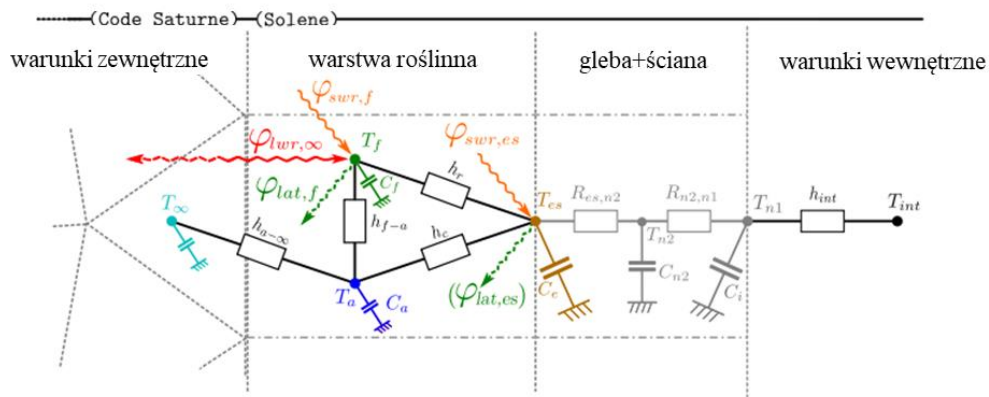
$$e_s(T_{air}) = 610,7 \cdot [1 + \sqrt{2 \sin\left(\frac{T_{air}}{3}\right)}]^{7,827} \quad (45)$$

$$\Delta = 44,352 \cdot \cos(T_{air}/3) \cdot [1 + \sqrt{2 \sin\left(\frac{T_{air}}{3}\right)}]^{7,827} \quad (46)$$

$$r_a = (1 - (K_{ar}^2 \cdot v_{air})) \cdot \ln\left(\left(\frac{z_m - d_0}{z_0}\right)^2\right) \quad (47)$$

$$r_s = r_{as}/(0,5 \cdot LAI) \quad (48)$$

Autorzy podkreślili, że istnieją różnice w procesach opisujących transport ciepła i masy przez żywą ścianę oraz zieloną fasadę. Przede wszystkim polegają one na wpływie siły ciężkości oraz występującego w przypadku żywych ścian podłoża glebowego.



Rysunek 8 Sieć węzłów cieplnych żyjącej ściany [15] (tłumaczenie własne)

W artykule [15] wskazano, że nie jest możliwe zastosowanie modeli transportu ciepła i masy dotyczących zielonych dachów w odniesieniu do zielonych ścian. Istnieje zbyt wiele różnic w procesach je charakteryzujących. Należą do nich m.in. obliczanie ewapotranspiracji czy rozkład wilgotności w podłożu roślinnym.

#### Model cieplno-wilgotnościowy zawarty w programie WUFI Plus

W przypadku wymiany ciepła oraz masy w przegrodach wykorzystać można dedykowane specjalistyczne oprogramowanie. Jest nim np. *WUFI Plus*, opracowane przez Instytut Fraunhofera, które stanowi kompleksowe narzędzie do symulowania warunków higrotermicznych oraz parametrów klimatu wewnętrznego. Ponadto, wykorzystywane jest do obliczania zapotrzebowania na ciepło dla budynku, jak i projektowania oraz certyfikacji budynków pasywnych. Oprogramowanie znajduje szerokie zastosowanie w branży inżynierskiej.

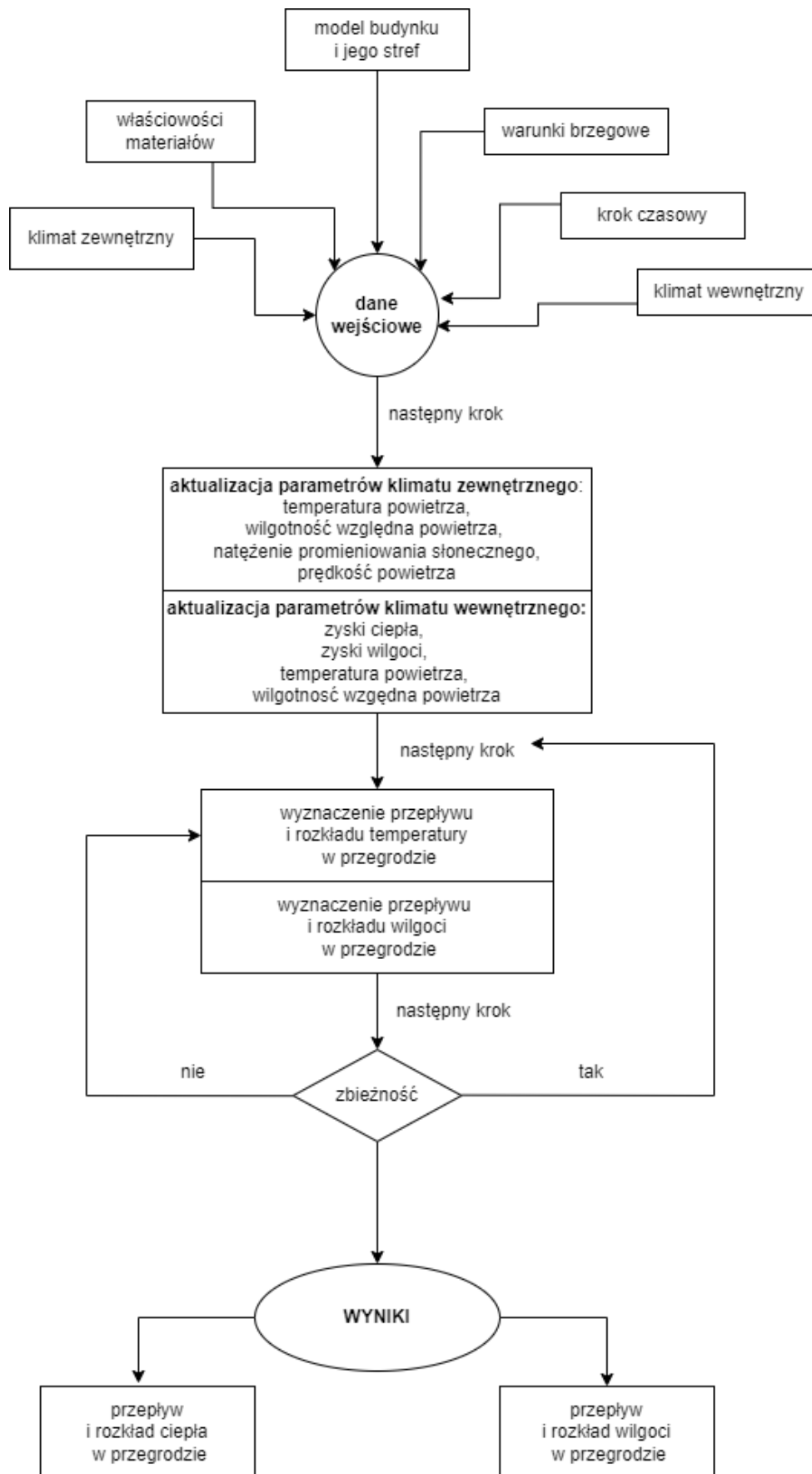
*WUFI Plus* opiera się na modelu Künzela (49)(50), który stosuje sprzężone równania transportu ciepła i masy w ośrodku porowatym opisujące niestacjonarny, jednowymiarowy, sprzężony transport ciepła i masy [133]. Badania opublikowane w artykule [134] wykazały, że na wymianę ciepła wpływ ma wilgotność przegrody, którą uwzględniono w równaniach. Do opisu transportu masy w porowatych materiałach budowlanych wykorzystano prawo Ficka.

$$\frac{dH}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (RH \cdot p_{sat})) \quad (49)$$

$$\frac{dX}{dRH} \cdot \frac{\partial RH}{\partial t} = \nabla \cdot ((D_{RH} \nabla RH) + \delta_p \nabla (RH \cdot p_{sat})) \quad (50)$$

Lewe strony obu równań opisują zjawisko akumulacji, które zależy od temperatury oraz ciepła właściwego i stopnia zawilgocenia materiałów przegrody. Działania z prawej strony zawierają wyrażenia przepływów ciepła oraz masy. Wymiana termiczna realizowana jest poprzez przewodzenie ciepła w materiale o danej wilgotności oraz jego przenoszenie mając na uwadze wykraplanie się wilgoci i oddawanie energii, a także jej pobieranie i parowanie. Rozwiązywanie równań następuje poprzez zastosowanie schematu, jaki przedstawia Rysunek 9. W tym celu wykorzystuje się metodę bilansów elementarnych.

Żeby model był skuteczny, należy określić warunki klimatyczne panujące podczas okresu wykonywanych analiz, w tym m.in. promieniowanie słoneczne, temperaturę oraz wilgotność powietrza. Ponadto w modelu należy zdefiniować poszczególne parametry przegrody jak np. współczynnik transportu cieczy, entalpię wilgotnego materiału, ciepło właściwe, ciśnienie cząstkowe pary wodnej, temperaturę, współczynnik przewodzenia ciepła, wilgotność względną i inne. Konieczne jest także określenie warunków początkowych i wskazanie kroku pomiarowego.



Rysunek 9 Uproszczony schemat blokowy obliczeń w programie WUFI Plus (opracowanie własne na podstawie [133,135])

Warto podkreślić, że równania zawarte w *WUFI Plus* sprawdzają się podczas opisu transportu ciepła i masy w przypadku przegród budowlanych, a także przy zastosowaniu na nich roślinności. Dużym atutem działań wykonywanych na ich podstawie jest to, że wyniki na nich bazujące są zoptymalizowane, a występujące błędy zbieżności ukazywane.

## **9. Badania doświadczalne**

W celu przeprowadzenia badań doświadczalnych zaprojektowano i wykonano stanowiska pomiarowe. Pomiary zrealizowano w dwóch istniejących budynkach mieszkalnych, w których długoterminowo mierzono parametry przegród, ich otoczenia, a także właściwości powietrza wewnętrznego. Wyniki prac były podstawą do opracowania modyfikacji statystycznej istniejącego modelu wymiany ciepła przez przegrodę w przypadku zastosowania zielonej ściany w klimacie umiarkowanym ciepłym typu przejściowego w okresie zimnym, a także do oceny komfortu termicznego w budynkach za pośrednictwem wielkości wybranych wskaźników.

Badania doświadczalne objęły także badania krótkoterminowe. Uwzględnily pomiar parametrów mikroklimatu w pomieszczeniach, a także badania ankietowe wśród mieszkańców. Na ich podstawie wykonano obliczenia oraz analizy wybranych wskaźników komfortu cieplnego.

### **9.1. Opis i charakterystyka stanowiska**

Badane obiekty zlokalizowane są w zachodniej części miasta Wrocław. Są to budynki mieszkalne pochodzące z lat 20-tych XX wieku. Ich ściany zbudowane zostały z cegły pełnej 12 cm oraz 24 cm, natomiast między nimi znajduje się 12-sto centymetrowa pustka powietrzna. Elewacja obiektów wykonana została z tynku wapiennego. Budynki posiadają 3 kondygnacje mieszkalne, jedną z nich stanowi poddasze użytkowe, są także podpiwniczone. Bryły obiektów zwieńczone są dwuspadowym dachem pokrytym dachówką. Przybliżona powierzchnia budynków to 132m<sup>2</sup>, a wysokość każdej z kondygnacji mieści się między 2,50m a 2,91m.



Zdjęcie 7 Obiekt objęty opracowaniem, elewacja południowa i zachodnia (kolekcja autorki)

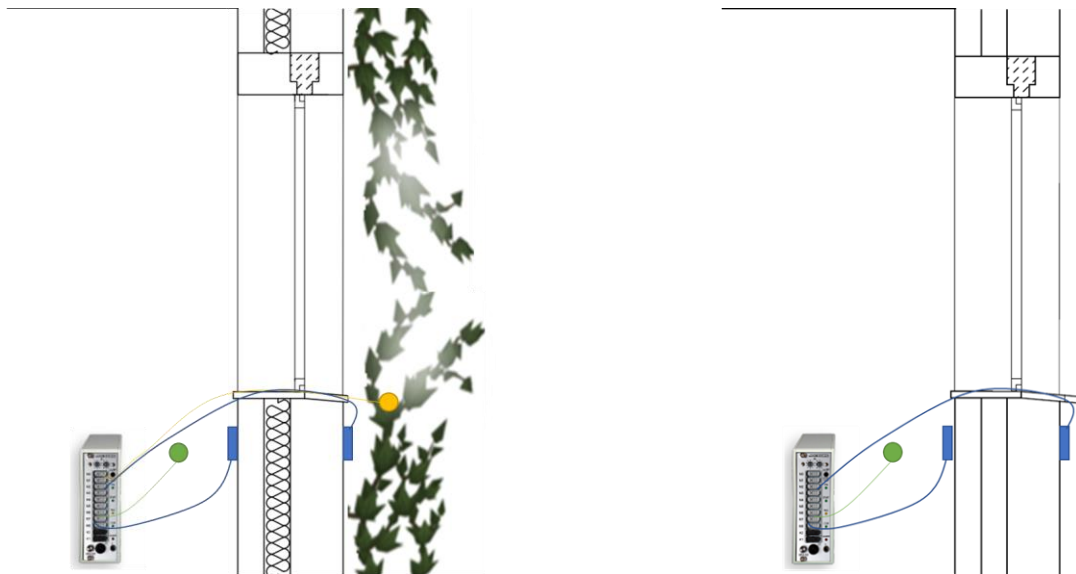


Zdjęcie 8 Obiekt objęty opracowaniem, elewacja północna i wschodnia (kolekcja autorki)

Ściany zewnętrzne jednego z budynków (Zdjęcie 7 oraz Zdjęcie 8) pokryte są pnączami, głównie winobluszczem oraz winoroślą, które zrzucają liście w okresie zimnym. Ściany zewnętrzne tego obiektu zostały zaizolowane pianką poliuretanową poprzez jej iniekcję (punktowe wstrzykiwanie) w pustkę powietrzną.

## 9.2. Stanowiska pomiarowe

Zaprojektowano dwa stanowiska pomiarowe na wybranych ścianach budynków, na bazie wiedzy autorki zdobytej w projektach badawczych. Stanowiska zlokalizowano w obszarze ścian zewnętrznych skierowanych na południe, w pokojach dziennych, zarówno w budynku z roślinnością na przegrodach, jak i w obiekcie bez zielonych ścian (w pomieszczeniu okresowo uruchamiana była klimatyzacja – nie była możliwa rejestracja czasu pracy i parametrów powietrza nawiewanego). Roślinność pokrywająca ścianę zewnętrzną w miejscu stanowiska stanowi zieloną fasadę wspinającą się częściowo po przygotowanej konstrukcji metalowej. Schemat rozmieszczenia urządzeń pomiarowych przedstawia Rysunek 10.



Rysunek 10 Schemat stanowiska badawczego; po lewej – budynek z warstwą roślinności, po prawej – bez roślinności. Czujnik żółty – pomiar temperatury, niebieski – temperatury powierzchni ściany, zielony – temperatury (opracowanie własne)

Stanowiska wyposażono w czujniki pomiarowe z automatyczną rejestracją mierzonych parametrów. Okres pomiarowy objął dni od 01.10.2021 r. do 14.01.2022 r., który stanowi 29% roku. Z uwagi na problemy techniczne wynikające z przerw zasilania, wystąpiły przerwy w rejestracji danych.

Stanowisko pomiarowe z zieloną ścianą wyposażono w zestaw czujników pomiarowych podłączonych do rejestratora, były to:

- 2 czujniki temperatury powierzchni przegrody,
- 1 czujnik temperatury,
- 1 czujnik temperatury i wilgotności względnej.

Ich przykładowe lokalizacje przedstawiają Zdjęcie 9 oraz Zdjęcie 10. Czujnik przylgowy mierzący temperaturę zewnętrznej części przegrody umieszczono w odległości około 30cm od otworu okiennego. Pomiar temperatury w otoczeniu roślinności realizowano w odległości około 30cm od otworu okiennego oraz około 7cm od ściany zewnętrznej budynku. Napyłany czujnik określający temperaturę wewnętrznej powierzchni ściany zewnętrznej z roślinnością zainstalowano około 1m od podłogi, narożnika budynku oraz okna, w celu zniwelowania wpływu mostków cieplnych na prowadzone pomiary. Temperaturę i wilgotność względną powietrza w pomieszczeniu mierzono w odległości około 15 cm od ściany zewnętrznej oraz około 40cm od okna. Rozmieszczenie czujników było ograniczone długością przewodów

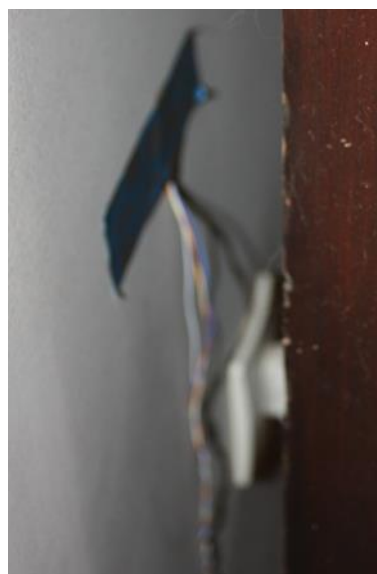


między sondami pomiarowymi a rejestratorem, a także przewodem zasilającym do urządzenia rejestrującego.

W obszarze zielonej ściany gromadzono dane dotyczące temperatury powietrza zewnętrznego, ponadto mierzono temperaturę powierzchni ściany konstrukcyjnej po stronie roślinności, jak i wewnętrznej części budynku. Natomiast w pomieszczeniu rejestrowano temperaturę oraz wilgotność względną powietrza. Wszystkie pomiary realizowano w 5- minutowym kroku czasowym, co było zgodne z wytycznymi zawartymi w *Standardzie ASHRAE 55* [87]. Dane wynikowe odpowiadają średniej wartości z pomiarów w kroku.



Zdjęcie 9 Przykładowe elementy stanowiska badawczego: rejestrator, czujnik temperatury oraz wilgotności względnej (kolekcja autorki)



Zdjęcie 10 Przykładowe elementy stanowiska badawczego: czujnik temperatury powierzchni (kolekcja autorki)

W budynku, na którym nie zastosowano roślinności, wykonano stanowisko pomiarowe wyposażone w czujniki tego samego typu. Zainstalowano:

- 2 czujniki temperatury powierzchni przegrody,
- 1 czujnik temperatury i wilgotności względnej.

Podobnie jak w pierwszym stanowisku, dane zostały rejestrowane w 5-minutowym kroku czasowym oraz w podobnych odległościach od poszczególnych elementów budynku.

W celu pozyskania danych dotyczących parametrów mikroklimatu w budynkach z zieloną ścianą i bez niej okresowo realizowano pomiary stacjonarne, wykorzystując kompleksowe urządzenie (zestaw do pomiarów parametrów mikroklimatu) wyposażone

w szereg sond, a także prowadzono badania ankietowe. Z uwagi na ograniczenia związane z dostępnością obiektów oraz urządzeń pomiarowych pomiary nie zostały prowadzone w sposób równoległy w obu badanych budynkach.

### **9.3. Sprzęt pomiarowy**

Badania objęły długoterminowy pomiar parametrów powietrza wewnątrz i na zewnątrz budynku, w szczególności temperatury oraz wilgotności względnej powietrza, jak i temperatury powierzchni przegrody. Zasady wykonywania pomiarów i wymagania dotyczące elementów pomiarowych określone zostały przez normę *PN-ISO 7726* [136]. Czujniki podłączono do rejestratora ALMEMO 8590-9 firmy Ahlborn posiadającego 9 wejść pomiarowych. Rekorder posiada możliwość przechowania 100 000 wartości w ustalonych przez użytkownika odstępach czasowych. Ma także możliwość konfiguracji pamięci, pierścieniowej oraz liniowej.

#### *Temperatura i wilgotność powietrza*

Temperaturę powietrza zewnętrznego oraz wewnątrz pomieszczeń mierzono za pośrednictwem rezystancyjnego czujnika temperatury ALMEMO model TOPE412 firmy Ahlborn. Zakres pomiarowy czujnika to  $-50^{\circ}\text{C}\pm 260^{\circ}\text{C}$ , natomiast dokładność pomiaru wynosi  $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$  przy temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$ .

Wilgotność względną oraz temperaturę powietrza w pomieszczeniu mierzono za pośrednictwem czujnika miniaturowego ALMEMO FHA646R (producent Ahlborn), którego zakres pracy to  $-30^{\circ}\text{C}\pm 100^{\circ}\text{C}$  dla temperatury oraz  $5\pm 98\%$  dla wilgotności względnej.

#### *Temperatura powierzchni przegrody*

Pomiar temperatury powierzchni przegrody wewnątrz i na zewnątrz budynku wykonano za pośrednictwem napylanego czujnika Pt100 ALMEMO FPA 686 firmy Ahlborn. Zakres pracy czujnika mieści się w zakresie  $-50^{\circ}\text{C}\pm 200^{\circ}\text{C}$ , natomiast dokładność pomiaru wynosi  $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$  przy temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$ .



Zdjęcie 11 Czujnik temperatury powierzchni (materiały producenta)

### *Mikroklimat pomieszczenia*





Fizyczne parametry powietrza niezbędne do oceny komfortu termicznego wewnątrz budynku zmierzono wykorzystując zestaw do pomiarów parametru mikroklimatu firmy Ahlborn.



Zdjęcie 12 Stanowiska do pomiaru parametrów mikroklimatu (kolekcja autorki)

Zestaw zawiera rejestrator danych oraz zestaw sond pomiarowych. Zestawienie elementów systemu przedstawia Tabela 11.

Tabela 11 Zestawienie oraz dokładny opis elementów urządzenia do pomiarów mikroklimatu (dane producenta)

Rodzaj urządzenia	Nazwa	Opis
	rejestrator danych  ALMEMO 2690	- 5 wejść pomiarowych - pojemność pamięci 512 kB, do 100 000 zmierzonych wartości - konfiguracja pamięci do liniowej lub pierścieniowej
	miernik temperatury promieniowania cieplnego  ALMEMO FPA805G TS	- zakres pomiarowy $-50^{\circ}\text{C}\pm 200^{\circ}\text{C}$ - dokładność pomiaru temperatury: $\pm 3^{\circ}\text{C}$ dla wartości $0^{\circ}\text{C}$
	cyfrowy czujnik temperatury, wilgotności i ciśnienia atmosferycznego  ALMEMO FHAD 46	- zakres pomiarowy $-40\pm 85^{\circ}\text{C}$ dla temperatury - zakres pomiarowy $5\pm 98\%$ dla wilgotności względnej - zakres pomiarowy $700\pm 1000\text{mbar}$ dla ciśnienia - dokładność pomiaru temperatury: $\pm 0.2\text{K}$ dla wartości $5\pm 60^{\circ}\text{C}$ , $\pm 0.4\text{K}$ dla wartości $5\pm 60^{\circ}\text{C}$ oraz $\pm 0.7\text{K}$ dla wartości $-20\pm 80^{\circ}\text{C}$ - dokładność pomiaru wilgotności względnej: $\pm 2\%$ RH dla wartości $10\pm 90\%$ i $\pm 4\%$ RH dla wartości $5\pm 98\%$ - dokładność pomiaru ciśnienia: $\pm 2.5\text{mbar}$ dla temperatury $23^{\circ}\text{C} \pm 5\text{K}$
	cyfrowy termooanemometr  ALMEMO FVAD	- zakres pomiaru $0.050\pm 1.000\text{m/s}$ - rozdzielczość urządzenia $0,001\text{m/s}$ - dokładność pomiaru $\pm 3\%$ mierzonej wartości
	czujnik stężenia dwutlenku węgla w powietrzu z zintegrowanym, cyfrowym czujnikiem ciśnienia atmosferycznego  ALMEMO FYAD	- zakres pomiarowy do $10000\text{ppm}$ - dokładność pomiaru $\pm 100\text{ppm} + 5\%$ zmierzonej wartości

## 10. Analiza zmierzonych i wyznaczonych parametrów

W okresie pomiarów, czyli między 01.10.2021 a 14.01.2022 zarejestrowano szereg danych, które poddano analizie. Należy zauważyć, że w dniach 10-13.10.2021 oraz 29.10-09.11.2021 nastąpiły problemy techniczne i dane z tego okresu nie zostały zarejestrowane. Pomiary objęły temperaturę powietrza wewnętrznego, powierzchni przegrody na zewnątrz oraz wewnątrz budynków, a także wilgotność względną.

Ponadto, do obliczeń oraz analiz niezbędne było uzyskanie szczegółowych danych dotyczących powietrza zewnętrznego. W tym celu przyjęte zostały dane pochodzące z czujników umieszczonych przy instalacji fotowoltaicznej Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej (udostępnione przez opiekunów stanowiska). Powyższe stanowisko zlokalizowane jest na budynku C-6 przy ul. C.K. Norwida 4/6. W miejscu instalacji mierzono i uzyskano dane obejmujące:

- prędkość powietrza zewnętrznego, m/s,
- natężenie promieniowania słonecznego,  $W/m^2$  (mierzone na powierzchnię o kącie nachylenia  $45^\circ$ ),
- wilgotność względną powietrza zewnętrznego, %,
- temperaturę powietrza zewnętrznego,  $^\circ C$ .

Powyższe parametry rejestrowano w odstępie 1 minuty. W celu ich zastosowania do pozostałych obliczeń uśredniono je w kroku 5-cio minutowym.

Zwykle wartość zmierzona za pośrednictwem urządzeń różni się od wartości określanej jako prawdziwa. Obserwacje i wyznaczone parametry są niepewne z uwagi na to, że obarczone zostały błędami, należą do nich błędy grube, przypadkowe i systematyczne. Dlatego niezbędne jest odróżnienie wyniku pomiaru, czyli przedziału, w którym zawiera się wartość prawdziwa, od wartości zmierzonej. [27]

Przed przystąpieniem do właściwych analiz wykluczono obserwacje odstające, obarczone błędami grubymi mogące mieć wpływ na wyniki przeprowadzanych obliczeń i analiz. Prace te zrealizowano w sposób polegający na niezależnej analizie poszczególnych parametrów. Podczas analiz uwzględniono niepewności pomiarowe. Założono, że w przypadku zmierzonych parametrów błędy pomiarowe równe są dokładnościom pomiarowym urządzeń je odczytujących (9.3 *Sprzęt pomiarowy*). W przypadku pomiarów pośrednich niepewności pomiarowe określają błędy graniczne. [27]

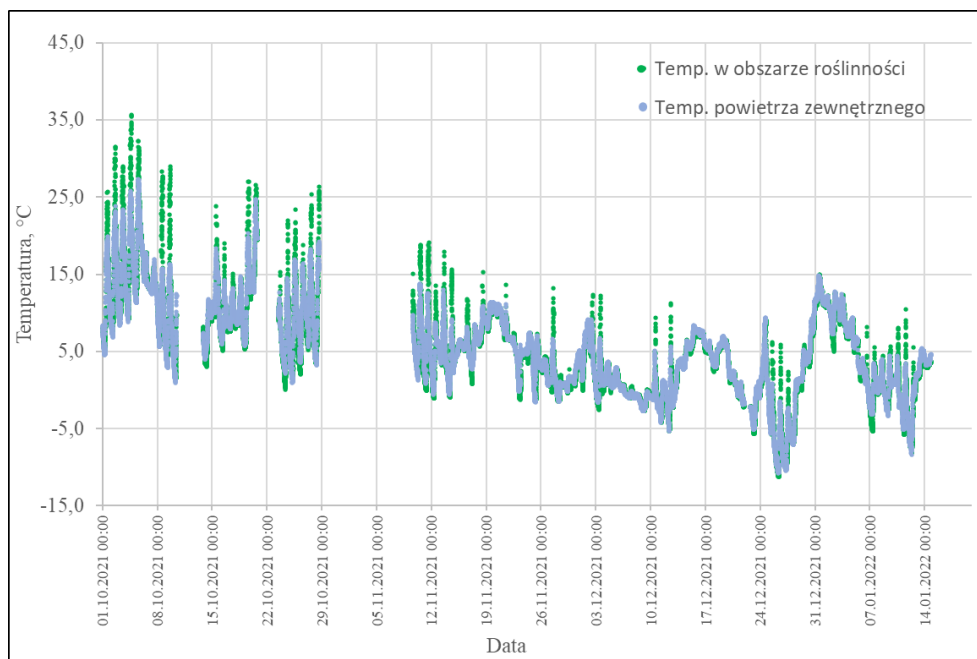
## 10.1. Temperatura w otoczeniu roślinności oraz powierzchni ścian zewnętrznych

Analizie poddano temperaturę powietrza w warstwie roślinności. W każdym z miesięcy, w których realizowano pomiary, wyznaczono minimalną, maksymalną oraz średnią temperaturę powietrza w warstwie zieleni. Wartości średnich temperatur w badanym okresie były dodatnie i wyniosły kolejno dla października 11,6°C, listopada 5,0°C, grudnia 1,5°C oraz stycznia 3,3°C. Natomiast minimalna i maksymalna temperatura powietrza w otoczeniu roślin podczas badanego okresu zostały zarejestrowane w grudniu i wyniosły -11,2°C oraz 35,7°C (taka wysoka temperatura powietrza mogła być związana z brakiem osłony radiacyjnej czujnika i spowodowana wpływem promieniowania słonecznego działającego bezpośrednio na czujnik temperatury).

Temperaturę powietrza w badanym okresie odniesiono do zmian temperatury powietrza zewnętrznego, Wykres 8. Widoczna jest korelacja<sup>2</sup> na poziomie  $R=0,96$  powyższych parametrów, zarówno w całym okresie przeprowadzanych badań, jak i w cyklu dobowym. Najwyższe wartości temperatur powietrza zewnętrznego występowała zazwyczaj między godzinami 13 a 17. W tych samych godzinach obserwuje się piki temperatury w warstwie zielonej ściany. Przypuszcza się, że wysokie wartości zarejestrowanych temperatur w warstwie roślinnej wynikają z południowej ekspozycji ściany i jej nagrzewaniem się oraz akumulacją ciepła w warstwie zieleni, a także ograniczeniem napływu powietrza, który ułatwiłby transport ciepła w tym obszarze. Warto podkreślić, że efekt ten jest pożądany w okresie jesień-zima-wiosna z uwagi na zmniejszenie zapotrzebowania budynku na energię przeznaczoną na cel ogrzewania.

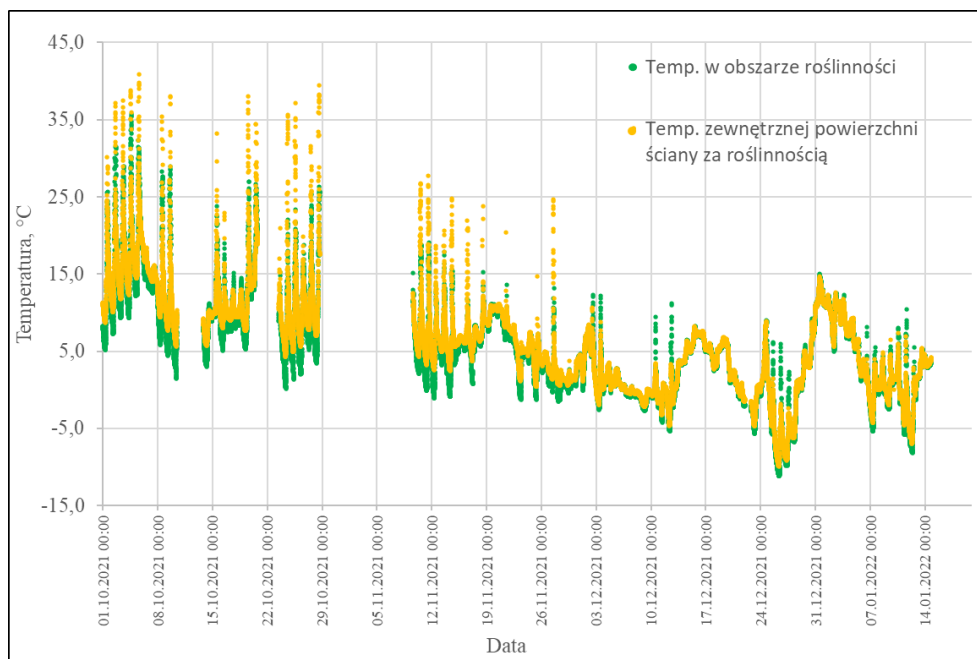
---

<sup>2</sup> współczynnik korelacji - miara stopnia zależności losowej między obserwacjami [27]. Współczynniki korelacji przyjmujące wartości ujemne i dodatnie wskazują na korelację ujemną (<0) oraz dodatnią (>0). Korelację  $R>0,6$  uznaje się powszechnie za istotną. Siłę powiązania między zmiennymi wyraża się za pośrednictwem  $R^2$ , czyli współczynnika determinacji [169].



Wykres 8 Zmienność temperatury powietrza zewnętrznego i powietrza w warstwie roślinności (opracowanie własne)

Porównano także temperaturę zewnętrznej powierzchni ściany za roślinnością w odniesieniu do temperatury powietrza w obszarze roślinności (Wykres 9). Na jego podstawie zauważyć można, że wartości temperatury przegrody są wyższe od panującej w warstwie roślinnej. Średnio różnice te wyniosły  $0,7^{\circ}\text{C}$ , natomiast maksymalne osiągnęły wartość chwilową nawet  $22,1^{\circ}\text{C}$ . Wysokie wartości (piki) temperatury mogą to spowodowane chwilowym bezpośrednim działaniem promieniowania słonecznego na czujnik temperatury powierzchni przegrody z uwagi na jego odsłonięcie z uwagi na stopień zagęszczenia liści. W całym badanym okresie widoczne są mniejsze dobowe różnice między wartością minimalną a maksymalną temperatury, porównując ścianę z roślinnością i bez niej. Na tej podstawie można wnioskować, że zielona ściana może mieć korzystny wpływ na przegrodę poprzez ograniczenie działania składników środowiska zewnętrznego, a w szczególności roli czynników termicznych.



Wykres 9 Zmienność temperatury zewnętrznej powierzchni ściany i powietrza w warstwie roślinności (opracowanie własne)

Należy mieć na uwadze także relację między temperaturą zewnętrzną a temperaturą w pomieszczeniu. Kiedy wewnątrz budynku powietrze jest cieplejsze niż na zewnątrz, wymiana ciepła następuje w kierunku od wnętrza do otoczenia zewnętrznego, w przeciwnym razie kierunek przepływu ciepła się zmienia. Analizy wykazały, że w okresach, gdy temperatury w pomieszczeniach są wyższe niż zewnętrzne, roślinność blokuje ucieczkę ciepła, a tym samym utrzymuje wyższą temperaturę w obszarze przegrody i przeciwdziała jej wychłodzeniu. Natomiast, w cieplejszym okresie, kiedy temperatury zewnętrzne są wyższe niż w pomieszczeniach, warstwa roślinna w niewielkim stopniu ogranicza wpływ promieniowania słonecznego i zapobiega jej szybkiemu nagrzewaniu.

Dane zmierzone w budynku bez warstwy roślin posłużyły do zamodelowania (na podstawie analiz statystycznych) temperatury zewnętrznej powierzchni przegrody konstrukcyjnej budynku. W tym celu sprawdzono korelacje między zewnętrzną temperaturą powierzchni przegrody a natężeniem promieniowania słonecznego, wilgotnością względną, prędkością i temperaturą powietrza zewnętrznego w okresie prowadzonych badań. Stwierdzono korelacje między wszystkimi powyższymi parametrami na poziomie  $R > 0,6$ . Na ich podstawie wykonano model regresji liniowej wielorakiej<sup>3</sup> (51) i wyznaczono wartości zewnętrznej temperatury powierzchni ściany bez roślinności.

<sup>3</sup> Metoda statystyczna, której celem jest opisanie współzależności kilku zmiennych poprzez funkcję. Wykorzystuje metodę iteracyjną z zastosowaniem wielomianów w celu dostosowania modelu do danych z próby [169]



$$T_{pout} = 0,936 \cdot T_{air} - 0,004 \cdot It + 0,069 \cdot V_{air} + 1,58 \quad (51)$$

Wyznaczono siłę relacji między temperaturami powierzchni ścian zewnętrznych z warstwą roślinności i bez w odniesieniu do natężenia promieniowania ( $It$ ), i wynoszą  $R^2=0,85$  dla przegrody z warstwą roślinności oraz  $R^2=0,72$  dla budynku bez zielonej ściany. Przeprowadzone analizy wykazały, że temperatura powierzchni zewnętrznej przegrody właściwej zależy także od natężenia promieniowania słonecznego, im wyższe wartości natężenia promieniowania słonecznego, tym temperatura powierzchni ścian jest wyższa.

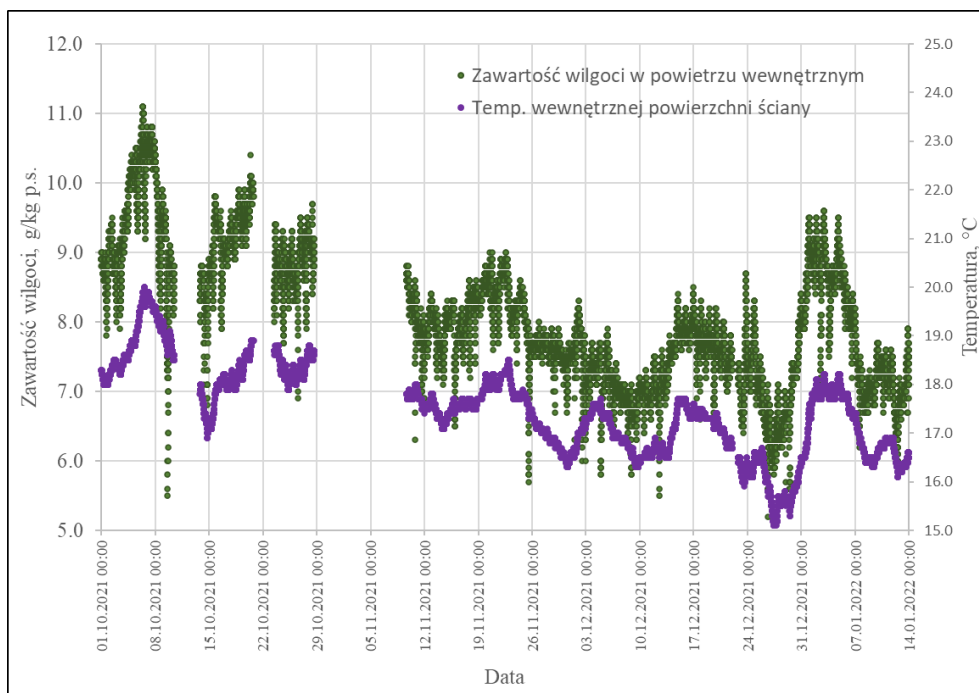
## **10.2. Wilgotność względna w pomieszczeniu, zawartość wilgoci w powietrzu wewnętrznym a temperatura powierzchni przegrody**

Podczas badań realizowano pomiary wilgotności względnej oraz temperatury powietrza w pomieszczeniu. Na podstawie równania stanu gazu, zastosowaniu prawa Daltona oraz wzoru definicyjnego opisującego wilgotność względną wyznaczono zawartość wilgoci ( $X$ ) w powietrzu wewnętrznym [137].

$$X = 0,622 \cdot \frac{RH \cdot p_{gs}}{p - RH \cdot p_{gs}} \quad (52)$$

Ciśnienie pary nasyconej powietrza ( $p_{gs}$ ) wyznaczono dla każdej wartości temperatury w pomieszczeniu na podstawie ogólnodostępnych tablic. Ciśnienie barometryczne ( $p$ ) przyjęto na poziomie 1013hPa.

Wykres 10 obrazuje zawartość wilgoci w powietrzu wewnętrznym oraz temperaturę wewnętrzną powierzchni ściany w budynku z roślinnością podczas okresu badań. Minimalny poziom stopnia zwilżenia powietrza w pomieszczeniu wyniósł 5,2g/kg p.s.. Natomiast maksymalną osiągniętą wartością było 11,1g/kg p.s.. Dane wahały się zarówno w okresie dobowym, jak i cyklu miesięcznym. Na podstawie wykresu oraz analiz statystycznych wykazano silną zależność powyższej temperatury oraz zawartości wilgoci w pomieszczeniu (współczynnik korelacji  $R=0,84$ ). Najniższy stopień wilgotności powietrza w pomieszczeniu występował w okresach pojawiania się najniższych wewnętrznych temperatur powierzchni przegrody.

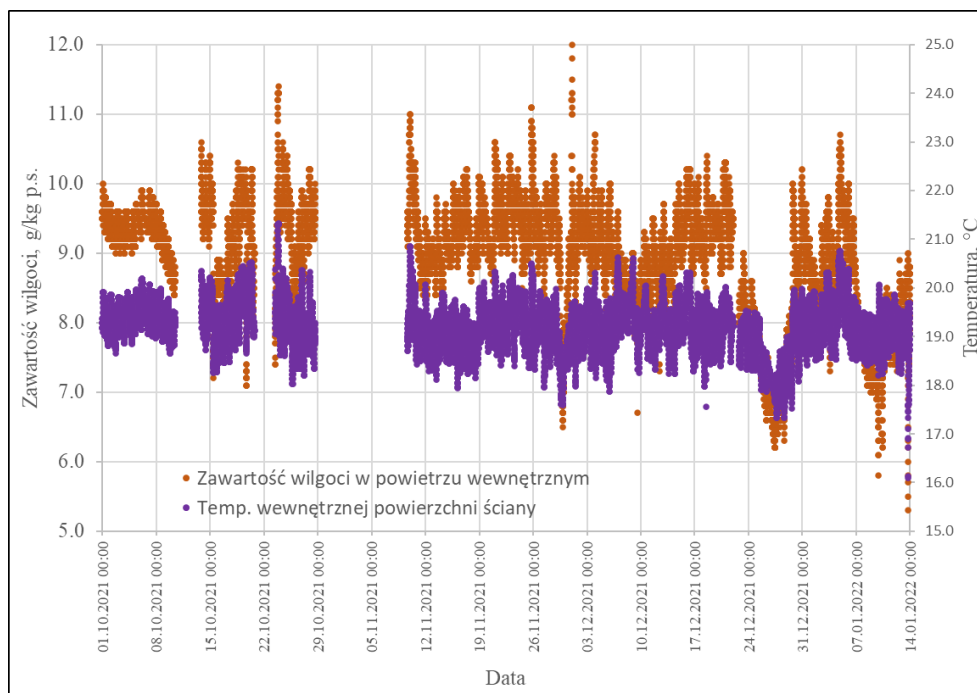


Wykres 10 Zmienność zawartości wilgoci w powietrzu oraz temperatury wewnętrznej powierzchni ściany z roślinnością (opracowanie własne)

Zmierzone w budynku bez zielonej ściany dane tj. temperatura powierzchni zewnętrznej przegrody, temperatura oraz wilgotność względna w pomieszczeniu były bazowymi parametrami do zamodelowania temperatury wewnętrznej powierzchni przegrody. Wykonano analizy statystyczne, które wykazały silne korelacje między ich wartościami. Na podstawie powyższych parametrów i przy wykorzystaniu modelu regresji liniowej wielorakiej wyznaczono równie opisujące temperaturę wewnętrznej powierzchni ściany bez roślinności (53).

$$T_{pin} = 1,001 \cdot T_{inbw} - 0,023 \cdot T_{pout} + 0,014 \cdot RH_{inbw} - 0,991 \quad (53)$$

Zależność między temperaturą wewnętrzną powierzchni ściany a zawartością wilgoci w pomieszczeniu budynku bez zielonych ścian także jest widoczna, przedstawia to Wykres 11. Analizy statystyczne wykazały korelację powyższych parametrów na poziomie  $R=0,60$  (dla zmierzonych danych  $R$  wynosi 0,66). Widoczne są także znaczne wahania obu parametrów w cyklu dobowym.



Wykres 11 Zmienność zawartości wilgoci w powietrzu oraz zamodelowanej temperatury wewnętrznej powierzchni ściany bez roślinności (opracowanie własne)

Mniejsza korelacja między temperaturą w powietrzu wewnętrznym a zawartością wilgoci w obiekcie bez warstwy roślinności, niż w przypadku ściany z roślinnością, może być spowodowana innym trybem użytkowania obiektów przez mieszkańców oraz zamodelowaniem części danych dotyczących temperatury powierzchni. Na podstawie obu wykresów (Wykres 10 i Wykres 11) wskazuje się, że wahania temperatur wewnętrznej powierzchni ściany w budynku z roślinnością i zawartości wilgoci w pomieszczeniu są dużo mniejsze w obiekcie z zielonymi ścianami niż bez.

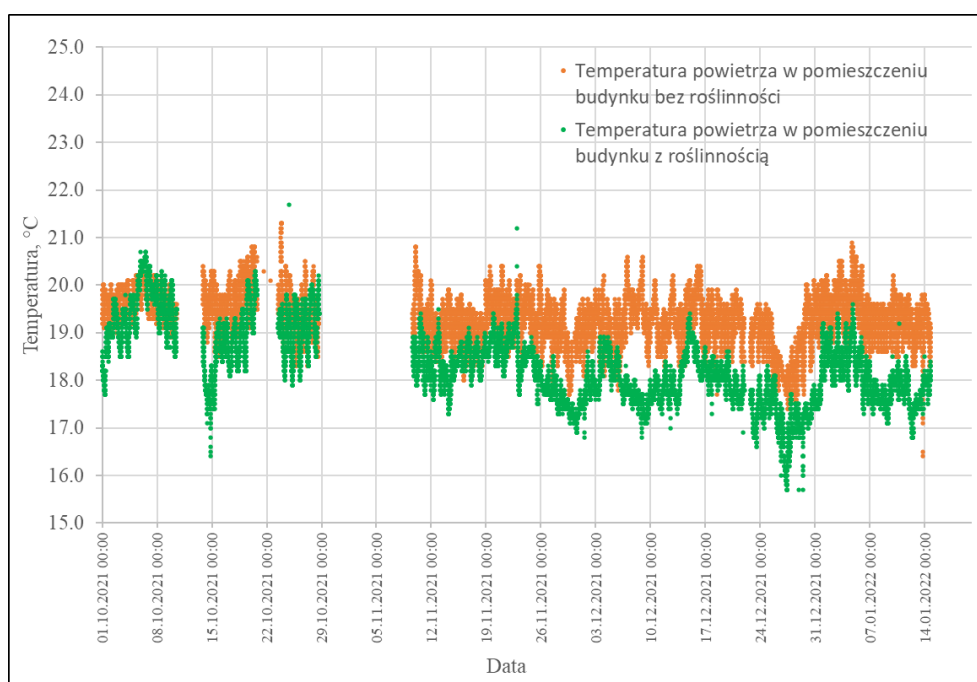
### 10.3. Temperatura promieniowania przegród

Pomiary w badanych obiektach prowadzono wieloaspektowo. Oprócz danych dotyczących przegród zewnętrznych mierzono także cyklicznie parametry mikroklimatu w pomieszczeniach objętych analizą. W tym celu rejestrowano średnie wartości w kroku 5-cio minutowym [87]:

- średniej temperatury promieniowania, °C,
- temperatury powietrza otaczającego, °C,
- wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu, %,
- ciśnienia atmosferycznego, Pa,
- prędkości powietrza, m/s
- stężenia dwutlenku węgla, ppm.

Wszystkie powyższe parametry związane są z utrzymaniem komfortu i jakością powietrza w pomieszczeniu, a także wpływają na samopoczucie ich użytkowników. Największy wpływ na komfort termiczny mają temperatura w pomieszczeniu oraz średnia temperatura przegród. Jak wspomniano w rozdziale 6. *Komfort cieplny*, w szczególności wymiana ciepła z powierzchni organizmu uzależniona jest m.in. od temperatury powietrza.

Wykres 12 ukazuje zmiany temperatury powietrza w pomieszczeniach budynków z roślinnością i bez podczas pomiarów długoterminowych. W budynku bez zielonych ścian zaobserwowano jej wyższe wartości (w okresie pomiarów średnią temperaturę wyznaczono na poziomie 19,3°C) w odniesieniu do pomieszczenia w obiekcie z roślinnością na przegrodach (średnia podczas pomiarów długoterminowych wyniosła 18,3°C). Na podstawie wykresu Köeniga (Wykres 5) określono, że komfort termiczny osiągnąć można, kiedy temperatura powietrza mieści się w zakresie 15°C a 20°C. Większość pomiarów (96%) mieści się w powyższym przedziale. Natomiast w celu określenia temperatury odczuwalnej należy odnieść je do średniej temperatury promieniowania.

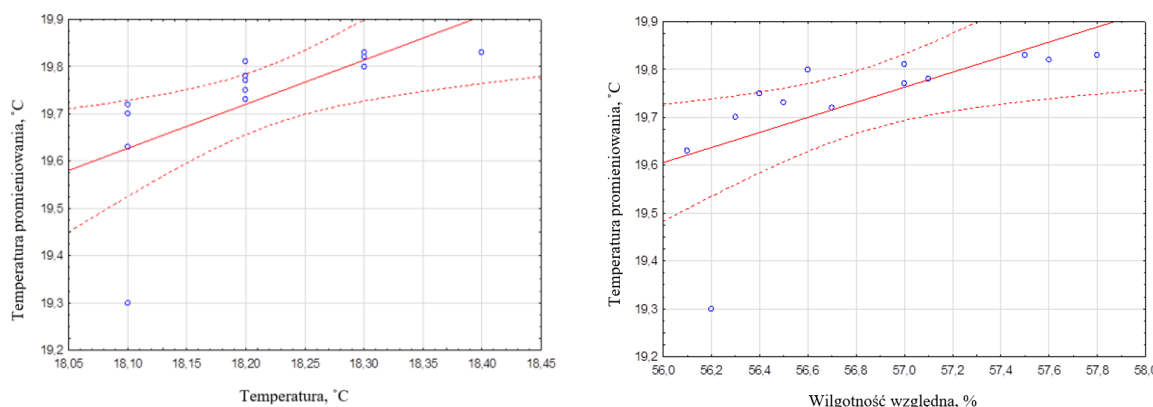


Wykres 12 Temperatura powietrza w pomieszczeniach budynków z roślinnością i bez niej (opracowanie własne)

Drugim istotnym w przypadku odczuć cieplnych parametrem, zaraz po temperaturze powietrza w pomieszczeniu, jest temperatura promieniowania [138]. W celu utrzymania komfortu termicznego wskazane jest, żeby temperatura promieniowania zbliżona była do temperatury otaczającego powietrza [138]. Składowymi temperatury radiacyjnej są wartości

temperatury powierzchni otaczających m.in. ścian zewnętrznych, okien, elementów grzewczych. Wpływ na nią mają także kształt pomieszczenia, oświetlenie, meblowanie, czy liczba osób aktualnie się w nim znajdujących [138]. W celu wyznaczenia temperatury promieniowania można posłużyć się kilkoma metodami, które zostały opisane w literaturze [139]. Można ją wyznaczyć za pośrednictwem urządzeń pomiarowych albo wyliczyć np. na podstawie temperatury otaczających przegród i współczynników kątowych.

W niniejszym opracowaniu, równania opisujące temperatury promieniowania w obu pomieszczeniach objętych badaniami, wyznaczono na podstawie analiz statystycznych (Wykres 13). Sprawdzono korelacje pomiędzy parametrami rejestrowanymi na stanowiskach badawczych, a zmierzoną w tym samym czasie temperaturą promieniowania za pośrednictwem kompleksowego urządzenia do rejestracji parametrów mikroklimatu.



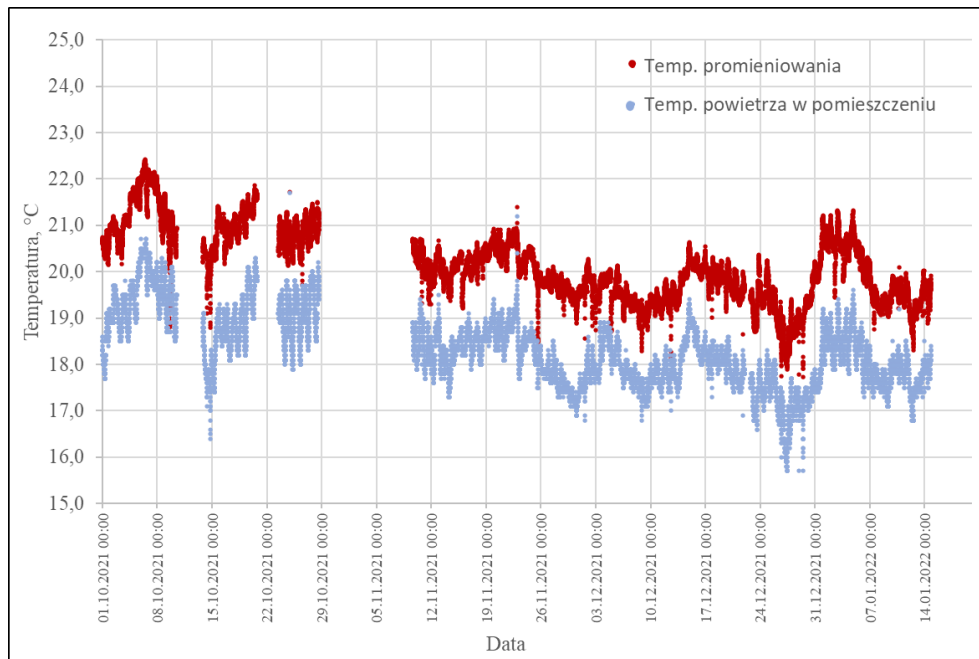
Wykres 13 Rozrzuty ukazujące powiązania temperatury powietrza i wilgotności względnej w pomieszczeniu a temperatury promieniowania w budynku z warstwą roślinności (opracowanie własne w programie Statistica)

Wykazano, że w przypadku pomieszczenia budynku, na którym zaimplementowana została zielona ściana, temperatura promieniowania zależy ściśle od temperatury wewnętrznej oraz wilgotności względnej w pomieszczeniu. Ich korelacja została wykazana na poziomie  $R=0,6$ . Za pośrednictwem regresji wielorakiej w zamodelowano średnią temperaturę promieniowania w pomieszczeniu budynku z roślinnością na przegrodzie zewnętrznej:

$$T_{rvw} = 0,6 \cdot T_{invw} - 0,08 \cdot RH_{invw} + 4,3 \quad (54)$$

Wykres 14 przedstawia zmienność zamodelowanej (statystycznie) temperatury promieniowania oraz temperatury powietrza w pomieszczeniu budynku z zieloną ścianą. Na jego podstawie zauważyć można, że różnice między tymi wartościami wahają się od  $0^{\circ}\text{C}$  do  $2,9^{\circ}\text{C}$ . Świadczyć może to o pozytywnym wpływie roślinności zastosowanej na przegrodach

zewnątrznych, tworzącej się izolacji termicznej w postaci pustki powietrznej między przegrodą a roślinnością oraz zastosowanej izolacji termicznej zlokalizowanej w pustce powietrznej.

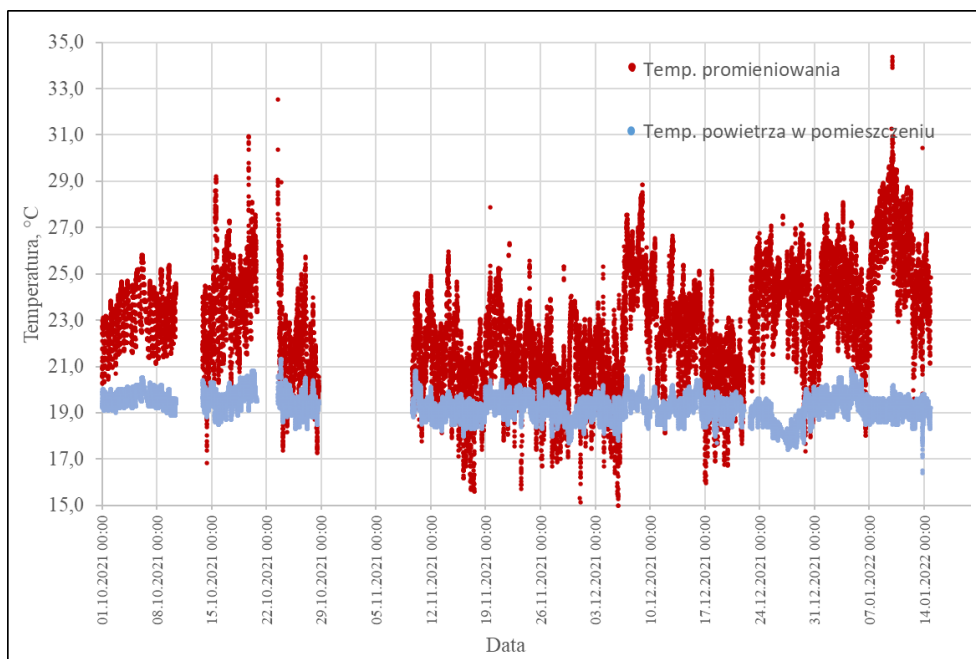


Wykres 14 Zmienność zamodelowanej (statystycznie) temperatury promieniowania oraz temperatury powietrza w pomieszczeniu budynku z warstwą roślinności na ścianie (opracowanie własne)

Dla pomieszczenia bez roślinności na ścianie zewnętrznej na podstawie wykonano analizy statystyczne, które wykazały wpływ temperatury wewnętrznej powierzchni ściany, temperatury oraz wilgotności względnej w pomieszczeniu na temperaturę promieniowania. Na tej podstawie oraz przy wykorzystaniu regresji wielorakiej w zamodelowano średnią temperaturę promieniowania:

$$T_{rvw} = 3,39 \cdot T_{inbw} - 0,47 \cdot RH_{inbw} - 0,17 \cdot T_{insbw} - 9,3 \quad (55)$$

Zmienność temperatury powietrza i zamodelowanej temperatury promieniowania dla pomieszczenia bez warstwy roślinnej na ścianach ukazuje Wykres 15.



Wykres 15 Zmienność zamodelowanej (statystycznie) temperatury promieniowania oraz temperatury powietrza w pomieszczeniu budynku bez warstwy roślinności na ścianie (opracowanie własne)

Na powyższym wykresie widoczne są znaczne różnice wartości obu parametrów sięgające nawet 14°C. Świadczyć może to o niejednorodnym rozkładzie temperatury odczuwalnej w pomieszczeniu. Należy jednak mieć na uwadze inne czynniki np. modelowanie statystyczne mogące wpływać na powyższy wynik.

## 11. Modelowanie statystyczne transportu ciepła przez przegrody z roślinnością

Wymiana ciepła przez ściany opisywana jest wieloma procesami. W celu określenia stopnia znaczenia poszczególnych parametrów w transporcie energii cieplnej przez przegrodę z roślinnością wymagane jest wyznaczenie i zbadanie relacji poszczególnych elementów opisujących warstwę biologicznie czynną. Niezbędne jest także określenie cech przegrody takich jak np. współczynnik przenikania ciepła.

W celu weryfikacji istniejącego modelu opisującego transport ciepła przez ścianę z roślinnością [13] wykorzystano dane zgromadzone podczas pomiarów terenowych w obiekcie objętym niniejszym opracowaniem oraz zarejestrowane parametry powietrza zewnętrznego w pobliżu instalacji fotowoltaicznej budynku C-6 Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej. Model zaimplementowano do oprogramowania *MS Excel* i za pośrednictwem poszczególnych równań, szczegółowo opisanych w rozdziale 8.1

*Model termiczny* wykonano obliczenia. Na podstawie powyższych danych wykonano analizy statystyczne, obliczenia oraz modyfikacje dotyczące opisu przepływu ciepła przez warstwę roślinności w okresie zimnym.

### **11.1. Dane wejściowe i założenia**

W celu zastosowania modelu matematycznego opisującego transport ciepła przez przegrodę z roślinnością zawartego w literaturze [13] i opisanego za pośrednictwem schematu, który przedstawia Rysunek 7, wprowadzono dane wejściowe. Uwzględniają one parametry klimatu zewnętrznego oraz gruntu, roślinności, otoczenia między roślinnością a przegrodą budynku, ścianą zewnętrzną budynku i powietrza wewnętrznego. Z uwagi na złożoność składowych modelu, dopuszczono pewne uproszczenia, które umożliwiły i przyspieszyły proces obliczeniowy. Niektóre z elementów były trudne do określenia, a przy nielicznych należałoby dokonać pomiaru dodatkowych parametrów, lecz m.in. ze względu na niedostępność sond pomiarowych podczas realizacji badań doświadczalnych było to niemożliwe. Dodatkowo należy nadmienić, że równania modelu [13] opisują poziomy przepływ ciepła przez przegrodę, pionowego nie uwzględniono.

#### ***Parametry powietrza zewnętrznego i gruntu***

Parametry powietrza zewnętrznego, niezbędne do opisu wymiany ciepła przez przegrodę z roślinnością w modelu [13] obejmują m.in. temperaturę ( $T_{air}$ ), wilgotność względną ( $RH_{air}$ ) oraz prędkość powietrza ( $V_{air}$ ). Mają one wpływ na straty ciepła z budynku oraz współczynnik konwekcji [140]. Wartością przyjętą do modelu jest także natężenie promieniowania słonecznego ( $I_t$ ). Wszystkie powyższe dane w celu wykonania analiz statystycznych przyjęto na podstawie parametrów udostępnionych ze stanowiska Wydziału Inżynierii Środowiska zlokalizowanego na budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej.

Powietrze zewnętrzne charakteryzuje molowe ciepło właściwe przy danym ciśnieniu atmosferycznym ( $c_{p,air}$ ) oraz ciśnienie atmosferyczne ( $P_{air}$ ). Z uwagi na brak dostępnych danych do dalszych analiz przyjęto wartości stałe  $P_{air}=100\text{kPa}$  oraz  $c_{p,air}=29,3\text{ J/mol}\cdot^{\circ}\text{C}$ . Ponadto, w modelu [13] niezbędne było określenie molowego przewodnictwa cieplnego pary wodnej w powietrzu ( $g_v$ ). W literaturze [141] wskazano je poziomie  $0,56\text{ mol/m}^2\cdot\text{s}$ , wartość tę przyjęto do dalszych analiz.

Obliczenia dotyczące transportu ciepła przez przegrodę z zieloną fasadą zawarte w literaturze [13] uwzględniają także temperaturę punktu rosy ( $T_{dewpoint}$ ) oraz współczynnik



emisyjności nieba ( $\varepsilon_{sky}$ ). Do dalszej części analiz statystycznych temperaturę punktu rosy wyznaczono na podstawie prostej zależności:

$$T_{dewpoint} = \sqrt[8]{\frac{RH_{air}}{100}} \cdot [112 + (0,9 \cdot T_{air})] + (0,1 \cdot T_{air}) - 112 \quad (56)$$

Natomiast emisyjność nieba ( $\varepsilon_{sky}$ ) wyliczono, stosując empiryczny model (57), który opisuje emisyjność czystego nieba zawarty w publikacji [142]. Jest to równanie Berdahla i Martina otrzymane na podstawie uśrednionych miesięcznych pomiarów nieba wykonanych w sześciu miastach Stanów Zjednoczonych.

$$\varepsilon_{sky} = 0,741 + 0,0062 \cdot T_{dewpoint} \quad (57)$$

Model zawarty w literaturze [13] opisuje wpływ gruntu za pośrednictwem współczynnika emisyjności ( $\varepsilon_{gr}$ ). W literaturze [143] wskazano, że w zależności od typu roślinności wartość tego współczynnika zmienia się. W otoczeniu obiektu objętego niniejszym opracowaniem rośnie trawa, w związku z tym do dalszych analiz przyjęto  $\varepsilon_{gr}$  o wartości 0,95. Natomiast uproszczeniem przyjętym w literaturze [13], a także zastosowanym w dalszej części opracowania jest założenie temperatury gruntu ( $T_{gr}$ ) taką jak temperatura powietrza ( $T_{air}$ ).

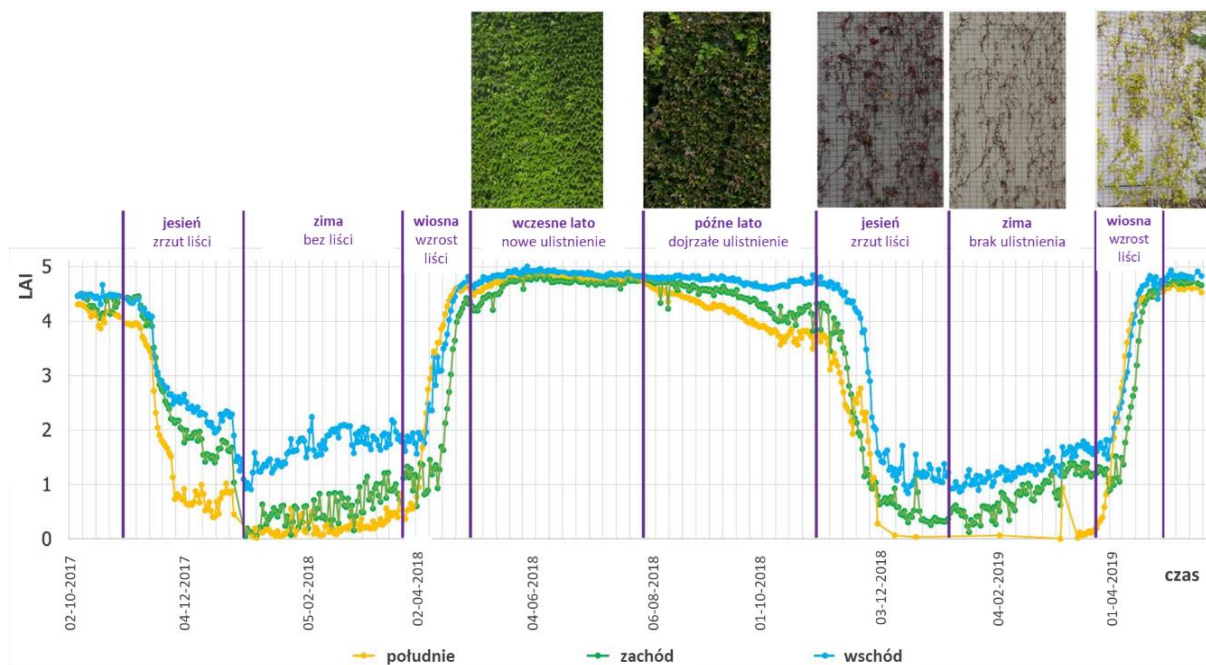
### *Parametry dotyczące roślinności*

Wymagane dane wejściowe definiujące roślinność w modelu transportu ciepła [13] obejmują stałe matematyczne, parametry rejestrowane podczas realizacji badań, a także wartości przyjęte oraz określone na bazie źródeł literaturowych. Parametry niezbędne do obliczeń wymiany ciepła przez przegrodę z roślinnością obejmują m.in. cechy roślin, w szczególności należą do nich:

- grubość warstwy roślinnej ( $D$ ), m,
- współczynnik absorpcji promieniowania przez liście ( $\alpha_{leaf}$ ), -,
- współczynnik emisyjności opisywany dla warstwy roślin ( $\varepsilon_{leaf}$ ), -,
- temperatura powierzchni liścia ( $T_{leaf}$ ), °C,
- wskaźnik pokrycia liściowego ( $LAI$ ), -,
- współczynnik tłumienia promieniowania przez roślinność ( $\kappa$ ), -,

- rzeczywista przewodność molowa aparatów szparkowych dolnej i górnej części liścia ( $g_{asll}$ ,  $g_{asul}$ ), mol/m<sup>2</sup>·s.

Podczas prowadzonych badań co około 2 tygodnie dokonywano wizji lokalnej obiektu. Na podstawie oceny wizualnej określono grubość warstwy roślinnej pokrywającą przegrodę zewnętrzną (do obliczeń i analiz statystycznych przyjęto wartości zmienne od 0,20m w okresie przejściowym do 0,05m w okresie zimowym). Daną wejściową do matematycznego opisu transportu ciepła przez ścianę pokrytą roślinnością jest także wskaźnik *LAI*. Określa on stopień wykorzystania światła przez rośliny. Wyższe wartości wskaźnika wskazują na większe wykorzystanie energii słonecznej w procesie fotosyntezy. Wysoka jego wartość oznacza, że liście zacierają się wzajemnie, a te niżej położone nie są w stanie efektywnie przeprowadzać fotosyntezy. Dlatego ocenie wizualnej i wyznaczeniu podlegał stopień ulistnienia zielonej ściany na obiekcie istniejącym. Na tej podstawie oraz wzorując się wykresie (Wykres 16) obrazującym wskaźnik *LAI* opisanym w literaturze [144] do realizacji analiz statystycznych wyznaczono jego przybliżone wartości w wybranych przedziałach czasowych podczas trwania badań.



Wykres 16 Zmienność wskaźnika *LAI* w zależności od ekspozycji oraz dnia w roku [144] (tłumaczenie własne)

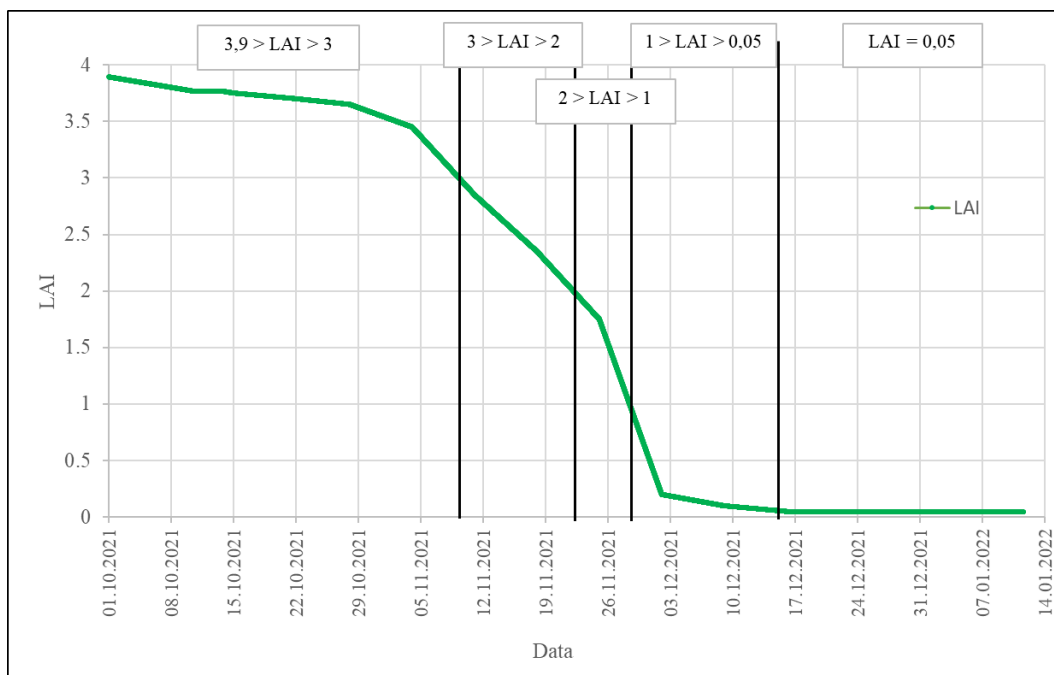
Wizualną oraz opisaną wskaźnikiem *LAI* zmienność stopnia ulistnienia w zależności od ekspozycji zielonej ściany oraz dnia w roku dla warunków i roślinności opisaną w literaturze

[144] przedstawia Wykres 16. Badania przeprowadzone oraz zestawione w publikacji [144] przez G. Perez, J. Coma i innych ukazują zmienność wskaźnika pokrycia liściowego w warunkach klimatu kontynentalnego śródziemnomorskiego dla zielonej ściany wykonanej z bluszczu bostońskiego, który nie jest rośliną zimozieloną podobnie jak winobluszcz. Wykres 16 ukazuje zmianę wskaźnika *LAI* między wartościami 0 a 5. Okresy przejściowe (wzrostu i gubienia ulistnienia roślinności) w danej lokalizacji wyznaczono na miesiące kwiecień, listopad oraz grudzień.



Zdjęcie 13 Stopień ulistnienia zielonej ściany w okresie zimowym 02.2022 (kolekcja autorki)

Zmienność stopnia ulistnienia dla budynku objętego niniejszym opracowaniem wyznaczono dla okresu pomiarowego. Jak wskazuje literatura [144,145] w okresie zimowym nie osiąga on wartości równej 0 z uwagi na gałęzie oraz liście, które nie zdążyły opaść (Zdjęcie 13). Dlatego jako minimalną wartość *LAI* przyjęto 0,05 dla okresu między 15.12.2021 a 14.01.2022. Natomiast na podstawie oceny wizualnej zielonej fasady, jej maksymalny stopień ulistnienia określono na poziomie 3,9. Zmienność wskaźnika ulistnienia dla roślinności zlokalizowanej na obiekcie objętym badaniami przedstawia Wykres 17.



Wykres 17 Zmienność wskaźnika  $LAI$  w okresie zimnym dla zielonej ściany objętej opracowaniem (opracowanie własne na podstawie obserwacji i danych literaturowych [144])

Parametrem opisującym roślinność porastającą ściany jest współczynnik absorpcji promieniowania ( $\alpha_{leaf}$ ). Na jego wartość wpływa rodzaj zastosowanych roślin, a w szczególności ich wiek oraz barwa i struktura liści [13,146]. Absorbacja promieniowania pozwala przetrwać roślinie w niesprzyjających warunkach zbyt wysokiego i stosunkowo niskiego natężenia promieniowania słonecznego. Ze względu na fakt, że każdy rodzaj zanieczyszczenia np. pyłowy ma wpływ na współczynnik absorpcji, dlatego też trudno jest jednoznacznie określić jego wartość. Na potrzeby niniejszego opracowania do analiz przyjęto wartość współczynnika absorpcji promieniowania liści wynoszącą 0,6 na dzień 01.10.2021, który obniżano do 0,4 z uwagi na zmiany barwy liści w czasie [13,132]. Literatura [147] wskazuje, że wraz ze zmianą stopnia ulistnienia zmienia się także współczynnik ekstynkcji światła.

Roślinność charakteryzuje także współczynnik tłumienia promieniowania ( $\kappa$ ). Jego wartość mieści się w zakresie  $\langle 0;1 \rangle$  [13]. Jest on zależny od kąta nachylenia liści tworzących zieloną fasadę. Kiedy ich powierzchnia jest prostopadła do ściany, przyjmuje wartość 0 [13]. Przyjęto, że liście roślin zielonej fasady układają się pod kątem  $45^\circ$ , ich współczynnik tłumienia promieniowania wynosi 0,5.

Współczynnik emisyjności dla warstwy roślin ( $\epsilon_{leaf}$ ) również został uwzględniony w modelu dotyczącym transportu ciepła przez przegrodę z zieloną fasadą [13]. W literaturze [143] wskazano, że wartość współczynnika zmienia się w zależności od typu zastosowanej

roślinności. Dla trawy przyjmuje się  $\varepsilon_{leaf}$  o wartości 0,95, natomiast dla gęstej roślinności 0,97. Większą z obu wartości przyjęto do dalszych analiz.

Liście roślin tworzących zieloną ścianę charakteryzują się rzeczywistą przewodnością molową aparatów szparkowych. Zarówno dolne, jak i górne ich części ( $g_{asll}$ ,  $g_{asul}$ ) określone są innymi wartościami. Do dalszych analiz statystycznych przyjęto rzeczywistą przewodność molową aparatów szparkowych dolnej i górnej części liści, wyznaczono je za pośrednictwem wzorów (58) oraz (59) zawartych w literaturze [141]:

$$g_{asul} = \frac{1}{3,33 \cdot \left( \frac{1000}{0,03 \cdot 1000 + It} + \left( \frac{0,39}{0,7} \right)^2 \right)} \quad (58)$$

$$g_{asul} = \frac{1}{5 \cdot \left( \frac{1000}{0,03 \cdot 1000 + It} + \left( \frac{0,39}{0,7} \right)^2 \right)} \quad (59)$$

W równaniach dotyczących promieniowania długofalowego (12) oraz wymiany radiacyjnej pomiędzy warstwą roślinną a ścianą budynku (13) uwzględniono wartość liczbową, stałą Stefana-Boltzmana. Wartość stałej promieniowania ciała doskonale czarnego wynosi  $5,673 \cdot 10^{-8}$ .

#### *Parametry w warstwie między roślinnością a przegrodą budynku*

Do parametrów modelu [13], na którym bazuje niniejsze opracowanie włącza się także te, opisujące warstwę między roślinnością a przegrodą budynku. Zaliczyć można do nich kąt nachylenia powierzchni przegrody  $\theta$  oraz współczynniki pomiędzy obiektami i źródłami promieniowania długofalowego ( $F$ ;  $F_{gr}$ ,  $F_{sky}$ ). Do dalszych analiz określono wartości współczynników  $F_{gr}$  oraz  $F_{sky}$ , na poziomie 0,5. Wyznaczono je na podstawie równań (31) oraz (32) uwzględniając kąt nachylenia powierzchni wynoszący  $90^\circ$ . Wartość współczynnika  $F$  przyjęto jako tę samą wartości co  $F_{gr}$  oraz  $F_{sky}$ , czyli 0,5.

#### *Parametry ścian zewnętrznych*

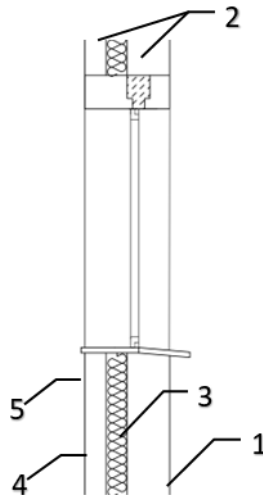
Model [13] transportu ciepła przez ścianę pokrytą roślinnością wymaga określenia całkowitych oporów cieplnych ( $R_{bw}$  oraz  $R_{vw}$ ) uwzględniających obliczeniowe opory cieplne każdej warstwy przegrody zewnętrznej. Budynki, w których zlokalizowano stanowiska pomiarowe, charakteryzują się podobną konstrukcją. Jednak z uwagi na zastosowane materiały

do budowy ścian zewnętrznych, a także zastosowanie roślinności na przegrodach, ich opór cieplny różni się. Współczynnik przenikania ciepła wyznaczono na podstawie normy *PN-EN ISO 6946 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania* [148].



Zdjęcie 14 Konstrukcja ściany zewnętrznej budynku, w którym wykonano stanowisko pomiarowe (udostępnione przez właścicieli budynku)

Budowę przegrody zewnętrznej w budynku bez roślinności przedstawia Rysunek 11 oraz Zdjęcie 14. Ścianę wykonano przy użyciu dwóch warstw cegły pełnej 24cm i 12cm, między nimi zastosowano 12-to centymetrową pustkę powietrzną. Ściana z obu stron została otynkowana, po stronie wewnętrznej dodatkowo zastosowano gładź cementową. Natomiast w przypadku obiektu z roślinnością na przegrodach pionowych, pustkę powietrzną wypełniono pianą poliuretanową ULTRAPOL poprzez punktowe wstrzykiwanie. Według informacji technicznej producenta materiał charakteryzuje współczynnik przewodzenia ciepła  $0,024\text{W/m}\cdot\text{K}$  zmierzony w temperaturze  $10^{\circ}\text{C}$ .



Rysunek 11 Przekrój zewnętrznej ściany budynku, fragment (opracowanie własne), 1-tynk, 2-cegła pełna, 3-pustka powietrzna wypełniona punktowo pianą poliuretanową, 4-tynk, 5-gładź

Roślinność na ścianie zewnętrznej posiada zdolność gromadzenia wilgoci w jej otoczeniu [145], dlatego w celu wyznaczenia oporu cieplnego cegły na podstawie wzoru (60) wyznaczono współczynnik przewodzenia ( $\lambda$ ) z uwzględnieniem wilgotności względnej powietrza zewnętrznego ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  to współczynniki równań, wynoszą  $a=4653576$ ,  $b=4258117$ ,  $c=0,91286$ ,  $d=0,0416$ ,  $e=0,7895$ ) [149]. Po wykonaniu i analizie zdjęć termowizyjnych uwzględniających stopień wypełnienia pustki oraz wliczając uśrednioną izolacyjność cieplną 20cm roślinności [9], wyliczono współczynnik przenikania ciepła równy  $0,26\text{W/m}^2\cdot\text{K}$  (na dzień 01.10.2021). Tę wartość przyjęto do kolejnych etapów obliczeń. Podczas całego okresu pomiarowego wartość tę korygowano zgodnie ze stopniem ulistnienia zielonej fasady.

$$\lambda = \frac{a \cdot d \cdot RH}{(1 + b \cdot RH) \cdot (1 - c \cdot RH)} + e \quad (60)$$

Współczynnik przenikania ciepła przegrody budynku bez warstwy roślinności wyznaczono na podstawie normy *PN-EN ISO 6946* [148] uwzględniając pustkę niewentylowaną. Dla tej przegrody współczynnik przenikania ciepła wynosi  $1,22\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ , wartość tę przyjęto do dalszych analiz.

Równania opisujące bilans ciepła (9) zawierają także inne składniki charakteryzujące przegrodę. Jednym z nich jest wskaźnik absorpcji promieniowania słonecznego przez nieosłoniętą ścianę ( $\alpha_{wall}$ ). Jego wartość równą 0,6 odczytano z tablic *Promieniowanie słoneczne pochłaniane przez różne materiały* (tłumaczenie własne) [150]. Określa on w sposób



przybliżony ułamek zaabsorbowanego promieniowania. Niezbędne było także określenie współczynnika emisyjności charakteryzującego powierzchnię ściany ( $\epsilon_{wall}$ ). Parametr ten przyjęto na bazie literatury [151]. Zdolność materiału do emitowania promieniowania określono na 0,9. Dla przegród zewnętrznych budynków zdefiniowano również ciepło właściwe ( $c_{pwall}$ ) oraz gęstość materiału przegrody. Wartości odczytano z tabel [152] oraz danych producenta i uśredniono dla obu obiektów. Współczynniki wyniosły odpowiednio dla przegrody bez roślinności  $c_{pwall} = 910 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  oraz  $\rho = 1350 \text{ kg/m}^3$ , dla przegrody z roślinnością  $c_{pwall} = 1030 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  oraz  $\rho = 1360 \text{ kg/m}^3$ . Temperaturę powierzchni przegrody za warstwą roślinności ( $T_{svw}$ ) przyjęto na podstawie zrealizowanych pomiarów w badanym obiekcie. Wszystkie powyższe wartości przyjęto do dalszych obliczeń i analiz statystycznych.

### *Parametry powietrza w pomieszczeniu*

Do danych uwzględnianych w modelu [13] opisujących warunki cieplne w badanym pomieszczeniu należy m.in. temperatura powietrza wewnętrznego. Na podstawie wartości zarejestrowanych podczas pomiarów długoterminowych w obu badanych obiektach wyznaczono całkowity strumień ciepła opisany w równaniu (16).

## **11.2. Badania statystyczne poszczególnych zmiennych równania**

W celu wykonania obliczeń na podstawie modelu opisującego przepływ ciepła przez przegrodę z roślinnością opisanego w literaturze [13] niezbędne jest określenie wartości szeregu danych wejściowych. Opisano to szerzej w rozdziałach 8.1 *Model termiczny* oraz 11.1 *Dane wejściowe*. Założono, że sam proces wymiany ciepła przez właściwą ścianę budynku jest zagadnieniem szczegółowo scharakteryzowanym w wielu pracach badawczych, dlatego nie został on szerzej rozwinięty w niniejszej pracy. Natomiast skupiono się na określeniu siły relacji poszczególnych parametrów, wartości wejściowych do równania transportu energii przez przegrodę z warstwą roślinności a ilością transportowanego przez roślinność ciepła. W tym celu posłużono się metodami statystycznymi.



Tabela 12 Korelacje pomiędzy zmiennymi przyjętymi w modelu a gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności (na podstawie modelu [13]) dla  $\alpha = 0,05$ . Korelacje wyznaczone na bazie 29500 pomiarów (opracowanie własne w programie Statistica)

Zmienna	R	R <sup>2</sup>
$T_{air}$	-0,041	0,002
$RH_{air}$	-0,218	0,048
$T_{sww}$	0,328	0,108
$T_{sbw}$	-0,120	0,014
$D$	-0,219	0,048
$V_{air}$	-0,014	0,000
$T_{dewpoint}$	-0,235	0,055
$I_t$	0,564	0,318
$\varepsilon_{sky}$	-0,262	0,069
$es(T_{air})$	-0,014	0,000
$LAI$	-0,049	0,002
$\tau$	0,075	0,006

Działania zawarte w modelu [13] bazują na zmiennych zależnych, niezależnych, jak i pewnych stałych wartościach. Za pośrednictwem metod statystycznych możliwe jest opisanie relacji między nimi oraz między wynikiem obliczeń. Przeprowadzono analizę korelacji na poziomie<sup>4</sup>  $\alpha = 0,05$  między zmiennymi z modelu [13] a wynikiem wykonanych obliczeń. Z punktu widzenia statystycznego, współczynniki korelacji między zmiennymi, których zestawienie przedstawia Tabela 12, są istotne. Oznacza to, że każda z powyższych danych jest powiązana z równaniem opisującym transport ciepła przez roślinność z siłą, na które wskazuje współczynnik determinacji [153]. Na podstawie powyższych analiz zauważyć można silną korelację między wynikiem wykonanych obliczeń dotyczących wymiany ciepła przez roślinność a natężeniem promieniowania słonecznego.

<sup>4</sup> Poziom istotności  $\alpha$ , oznaczający 5% prawdopodobieństwo błędnie ocenionej relacji między zmiennymi, przyjęto na podstawie ogólnie przyjętych za wystarczające do oceny. Wyniki istotne na poziomie  $\alpha=0,01$  uważa się powszechnie za statystycznie istotne, zaś wyniki istotne na poziomie  $\alpha=0,005$  lub  $\alpha=0,001$  nazywane bywają wysoce istotnymi [169].

Tabela 13 Korelacje pomiędzy zmiennymi przyjętymi w modelu a gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności z uwzględnieniem wskaźnika *LAI* dla  $\alpha = 0,05$ . Korelacje wyznaczone na bazie 29500 pomiarów (opracowanie własne w programie Statistica)

Zmienna	<i>LAI</i> = 0÷1		<i>LAI</i> = 1÷2		<i>LAI</i> = 2÷3		<i>LAI</i> = 3÷4	
	R	R <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup>
<i>T<sub>air</sub></i>	0,079	0,006	-0,015	0,000	0,139	0,019	0,008	0,000
<i>RH<sub>air</sub></i>	-0,398	0,158	-0,334	0,112	-0,482	0,232	-0,198	0,039
<i>T<sub>swv</sub></i>	-0,013	0,000	0,017	0,000	0,357	0,127	0,348	0,121
<i>D</i>	-0,174	0,030	-0,442	0,195	0,084	0,007	-0,043	0,002
<i>V<sub>air</sub></i>	-0,032	0,001	0,028	0,001	-0,192	0,037	-0,156	0,024
<i>It</i>	0,982	0,964	0,926	0,858	0,841	0,707	0,563	0,318
<i>T<sub>dewpoint</sub></i>	-0,097	0,009	-0,304	0,092	-0,097	0,009	-0,253	0,064
<i>ε<sub>sky</sub></i>	-0,097	0,009	-0,304	0,092	-0,097	0,009	-0,253	0,064
<i>es(T<sub>air</sub>)</i>	0,071	0,005	-0,019	0,000	0,161	0,026	0,031	0,001
<i>LAI</i>	-0,225	0,051	-0,447	0,199	0,077	0,006	-0,049	0,002
<i>τ</i>	0,225	0,051	0,443	0,196	-0,074	0,005	0,045	0,002

Wykonano także obliczenia uwzględniające siłę związku poszczególnych parametrów między gęstością strumienia transportowanego ciepła przez zastosowaną roślinność z uwzględnieniem wskaźnika *LAI* (Tabela 13). Analizy wykazały, że dla każdego z zakresów wskaźnika ulistnienia (0÷1, 1÷2, 2÷3, 3÷4) najsilniejsza korelacja gęstości strumienia transportowanego ciepła przez warstwę roślinności występuje między natężeniem promieniowania słonecznego. Siła korelacji określona została za pośrednictwem współczynnika determinacji, waha się między 0,982 dla najmniejszego stopnia ulistnienia a 0,318 dla najwyższego zakresu *LAI*.

### 11.3. Modyfikacja istniejącego modelu matematycznego

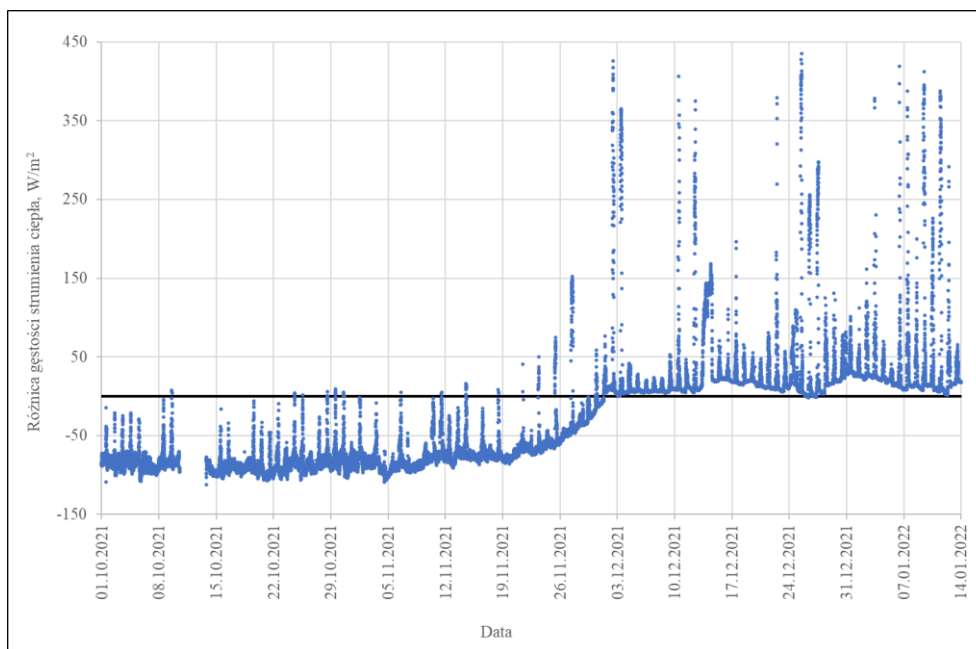
Każde miejsce na globie przyporządkowane zostało klimatowi, który reprezentowany jest przez pewne charakterystyczne cechy m.in. szerokość geograficzną, ukształtowanie terenu, odległość od zbiorników morskich czy rozmieszczenie układów barycznych. Polska znajduje się w strefie klimatu umiarkowanego ciepłego typu przejściowego, cechującego się dużą zmiennością w cyklu rocznym. Panujące warunki oddziałują także na roślinność, w szczególności na stopień zagęszczenia i stan ulistnienia oraz okres wegetacji.

Istniejący model [13] opisujący transport ciepła przez przegrodę z zieloną ścianą zweryfikowany został na danych z obiektu znajdującego się na obszarze klimatu umiarkowanego zimnego w okresie ciepłym. Jego założenia uwzględniają jednostronny kierunek przepływu ciepła, natomiast podczas odwróconego procesu opór roślinności określano wartością równą  $0\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ . W niniejszym opracowaniu założono, że roślinność także

ma wpływ na gęstość strumienia ciepła, gdy temperatura zewnętrzna jest niższa niż w pomieszczeniu, dlatego uwzględniono zmianę kierunku przepływu ciepła. Żeby możliwe było wykorzystanie tego modelu w polskim klimacie, charakteryzującym się wyższymi temperaturami w lecie i zimie, niezbędne było sprawdzenie działania modelu na danych uzyskanych z pomiarów zrealizowanych w niniejszym opracowaniu dla okresu zimnego oraz jego modyfikacja za pośrednictwem metod statystycznych.

#### *Weryfikacja istniejącego modelu opisanego w literaturze w odniesieniu do zebranych danych*

Na podstawie zebranych oraz przyjętych danych zweryfikowano model opisany w literaturze [13]. Obliczenia wykazały jego niedopasowanie do parametrów w klimacie umiarkowanym na terenie Polski w okresie zimnym, obrazuje to Wykres 18.



Wykres 18 Różnice między gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą - weryfikacja modelu [13] (opracowanie własne)

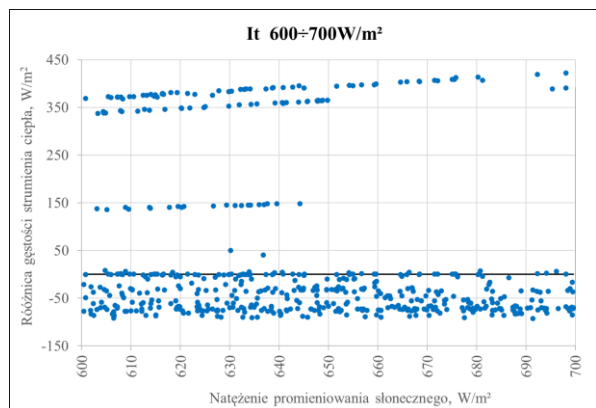
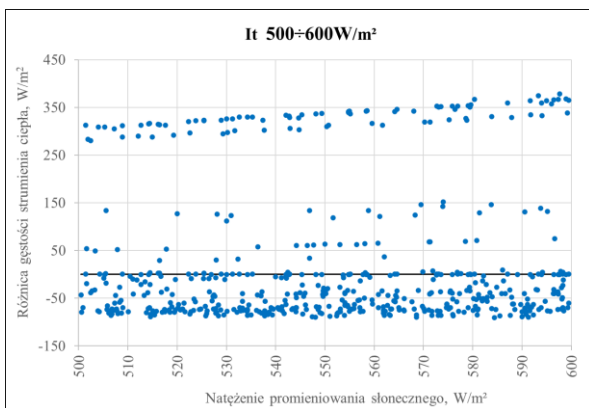
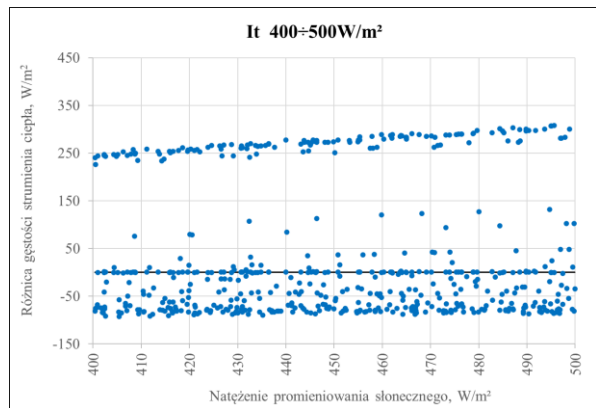
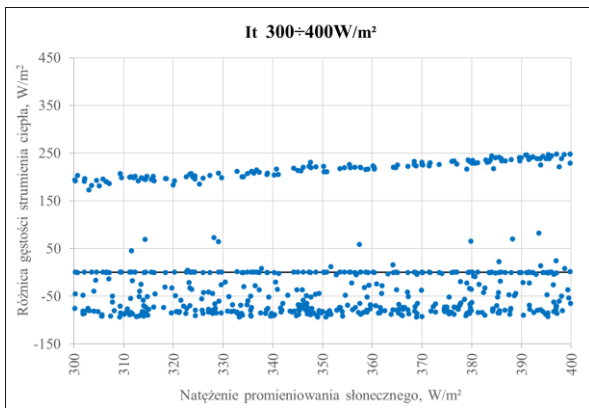
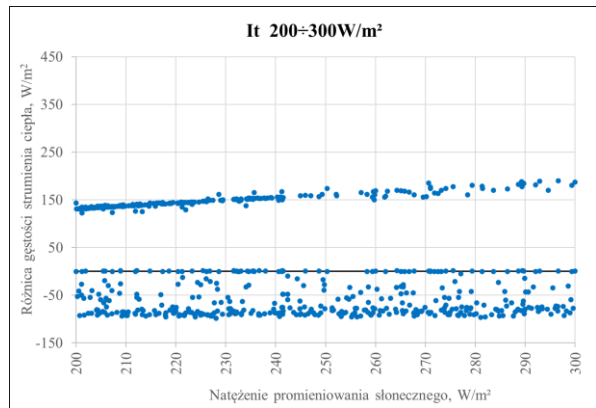
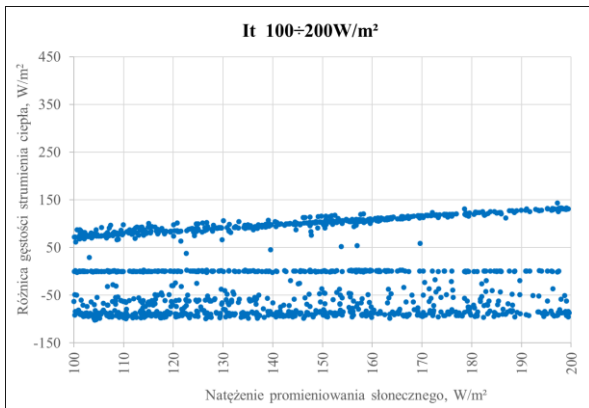
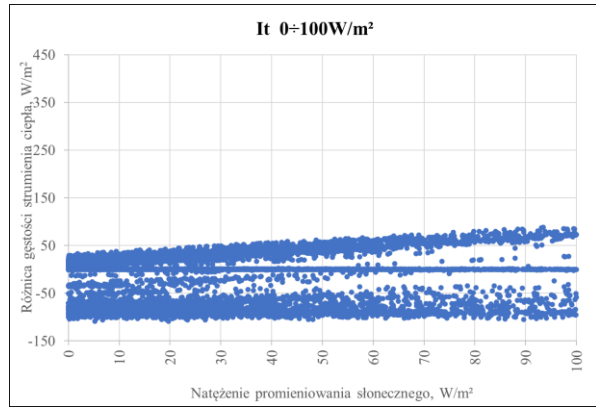
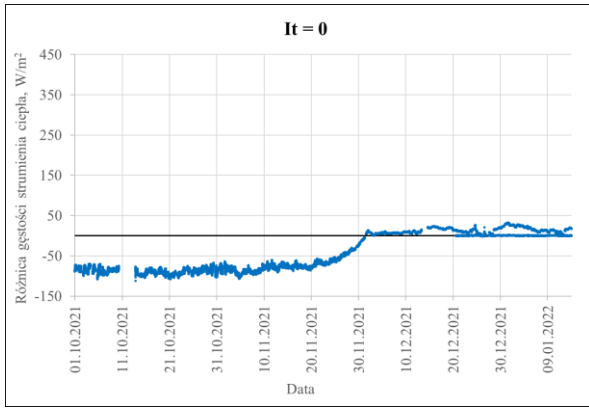
Zobrazowane poprzez Wykres 18 różnice gęstości strumienia ciepła pomiędzy warstwą roślinności i ścianą, na której została zaimplementowana, otrzymane na podstawie obliczeń z modelu [13], znacznie odbiegają od wartości, które świadczyłyby o zbilansowaniu energii transportowanej przez ścianę z warstwą roślinności, czyli  $0\text{W/m}^2$ . Wartości te osiągają od  $-112\text{W/m}^2$  aż do  $435\text{W/m}^2$ , co stanowi bardzo dużą rozbieżność. Na podstawie wykresu wskazano trzy przedziały:

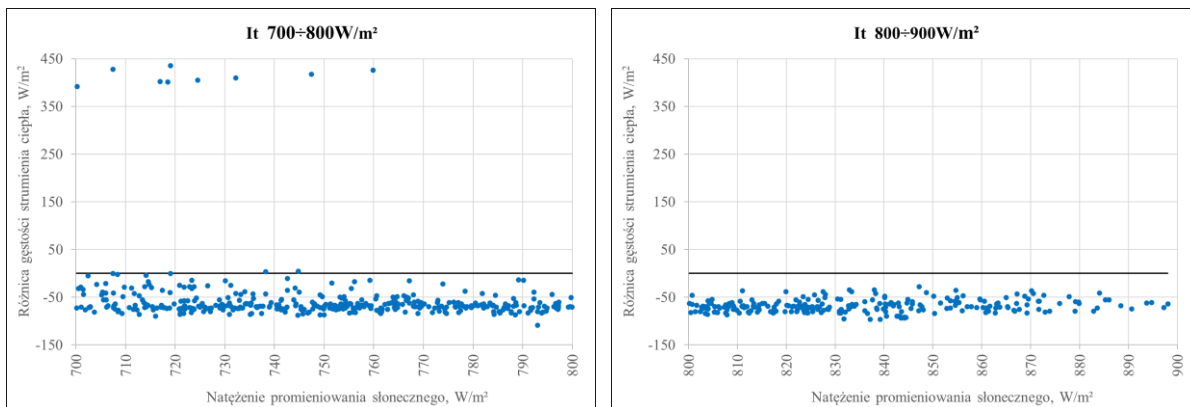
- pierwszy, kiedy różnice między gęstością strumienia ciepła transportowanego przez warstwę roślinności a ścianę osiągają najniższe wartości (okres między 01.10.2021 a 19.11.2021),
- drugi - przejściowy, gdy następuje wzrost wartości różnic między gęstością strumienia ciepła transportowanego przez warstwę roślinności a ścianę, zarówno wartości ujemne, jak dodatnie (okres między 19.11.2021 a 01.12.2021),
- trzeci, kiedy obliczone różnice między gęstością strumienia ciepła transportowanego przez warstwę roślinności a ścianę osiągają najwyższe wartości (okres od 01.12.2021 do 14.01.2022).

Taki rozkład pokrywa się w pewnym stopniu z danymi, które przedstawia Wykres 17, i związany jest ze wskaźnikiem ulistnienia *LAI*. Stąd wniosek, iż niezbędna jest modyfikacja statystyczna modelu zawartego w publikacji [13], w celu możliwości opisanego zjawiska w warunkach polskiego klimatu umiarkowanego (ciepły typu przejściowego) w okresie zimnym. Model zawarty w literaturze [13] opiera się na zarejestrowanych danych, a także na wyliczeniach poszczególnych składników. Przypuszcza się, że w zależności od pierwotnie nie ujętych, bądź ujętych w niewystarczającym stopniu czynników, istotność poszczególnych składowych równania bilansu cieplnego opisującego transport ciepła przez przegrodę z roślinnością się zmienia.

#### *Statystyczne opracowanie danych*

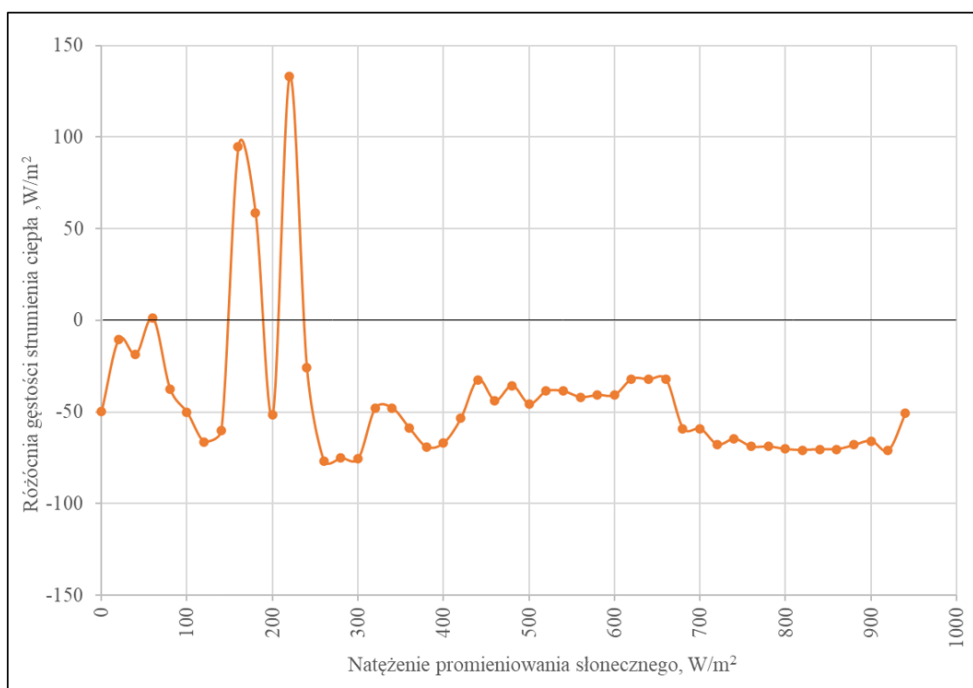
Zgromadzone dane zaimplementowano do modelu [13]. Na tej podstawie wykonano obliczenia dotyczące transportu ciepła przez przegrodę z roślinnością. Ich wyniki, podzielone ze względu na docierające promieniowanie słoneczne przedstawia Wykres 19. Na podstawie danych dla promieniowania  $I_t=0\text{W/m}^2$  przypuszczać można, że uzyskane wartości zmieniają się od ujemnych po dodatnie z uwagi na zmniejszający się współczynnik ulistnienia zielonej ściany *LAI*.





Wykres 19 Różnice między gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą obliczone na podstawie pomierzonych danych i modelu [13] w zależności od natężenia promieniowania słonecznego dla jego różnych zakresów (opracowanie własne)

Mnogość danych zgromadzonych w trakcie trwania pomiarów w okresie zimnym (około 280 tys.), Wykres 19, wymusiła podzielenie danych. Dane posegregowano z uwagi na natężenie promieniowania słonecznego, gdyż zgodnie z wskaźnikami, które przedstawia Tabela 12, jest to czynnik najbardziej skorelowany z transportem ciepła przez roślinność. Na tej podstawie wyznaczono punkty centralne, co  $20\text{W/m}^2$  w przedziale natężenia promieniowania od  $0\text{W/m}^2$  do  $940\text{W/m}^2$ . Uwzględniono 5-cio minutowy krok czasowy. Dane te posłużyły za próbę niezbędną do modyfikacji statystycznej istniejącego modelu [13], zakładając że została ona określona jako reprezentatywna.

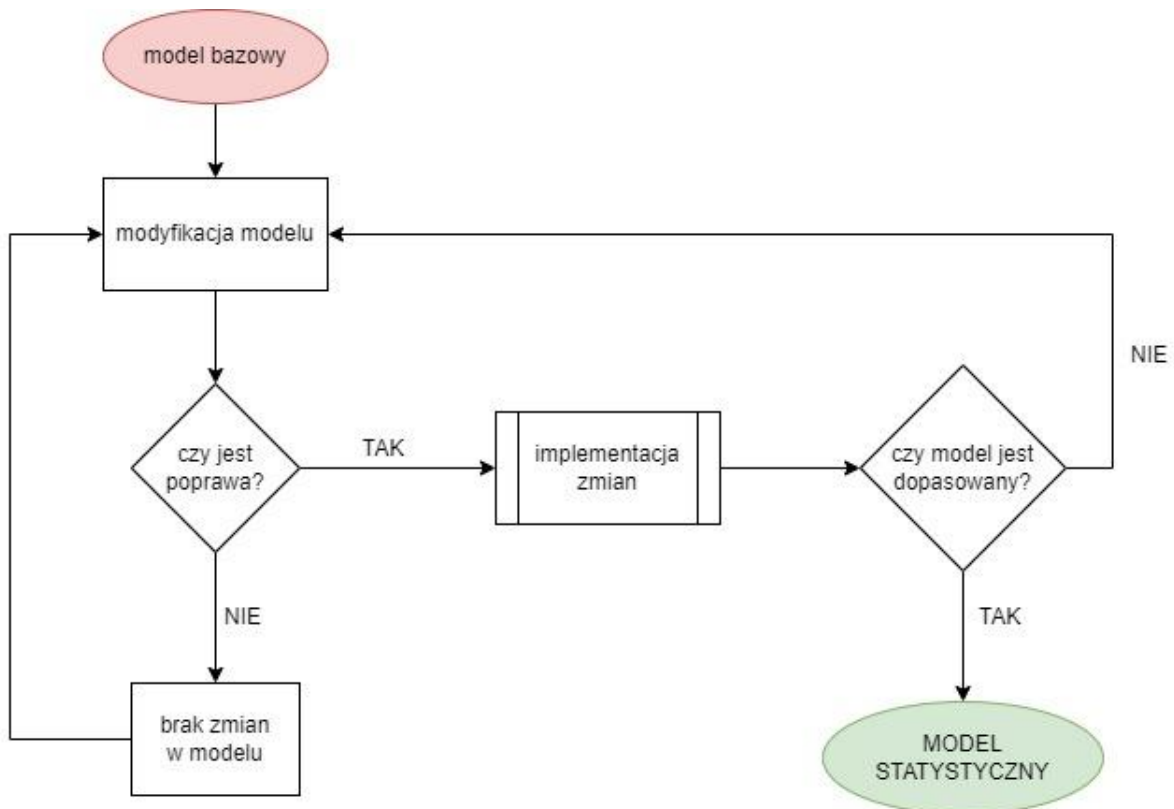


Wykres 20 Zależność między uzyskaną medianą (punkty centralne) różnic gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą obliczona na podstawie modelu [13] a natężeniem promieniowania słonecznego (opracowanie własne)

Wykres 20 przedstawia mediany (do prezentacji danych wykorzystano mediany z uwagi na duży przedział opisywanych wartości [153]) uzyskanych różnic gęstości strumienia ciepła transportowanego przez roślinność a ścianę w przedziałach co  $20\text{W/m}^2$ . Z uwagi na brak lub zbyt mały zbiór danych reprezentujących wartości wynikowe modelu dla natężenia promieniowania słonecznego w zakresie  $940\div 1000\text{W/m}^2$  nie zamieszczono ich na powyższym wykresie. Ukazane dane ponownie wskazują na niedopasowanie modelu zawartego w literaturze [13] do danych uzyskanych w warunkach klimatu polskiego, w którym znajduje się badany obiekt, różnice gęstości strumienia ciepła sięgające nawet  $146\text{W/m}^2$ .

### *Modyfikacje istniejącego modelu - model statystyczny*

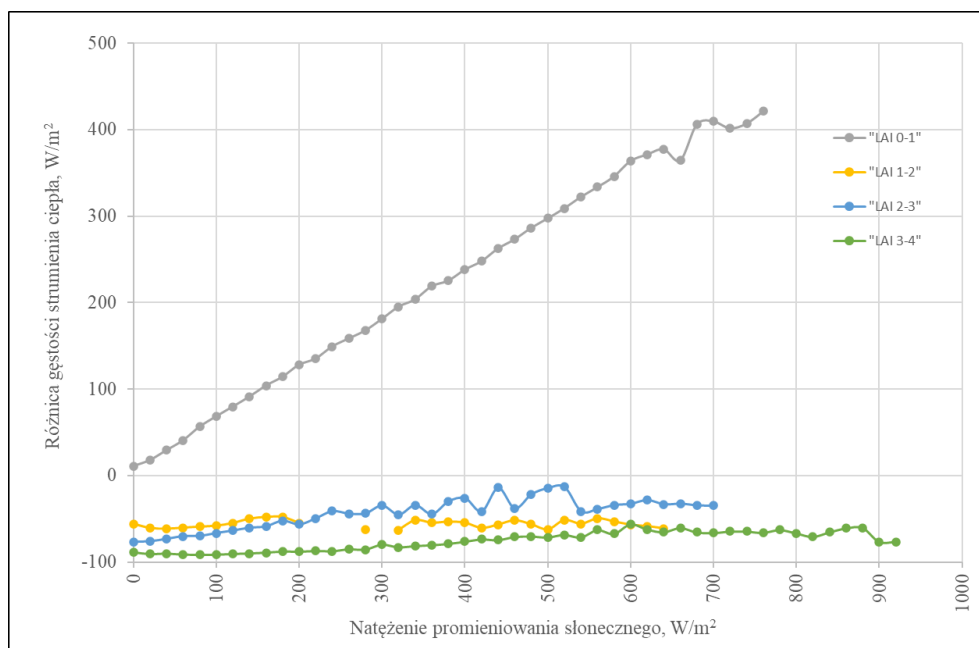
Modyfikacje modelu [13] opisanego w równaniach (9)÷(32) przeprowadzono wieloetapowo. Uwzględnili one połączenie reprezentacji wyników pomiarów wraz z estymacjami parametrów zawartych w modelu. Każdy z etapów związany był z analizami statystycznymi oraz weryfikacją za pośrednictwem zgromadzonych na bazie pomiarów danych. Schemat pracy nad stworzeniem modelu statystycznego przedstawia Rysunek 12.



Rysunek 12 Uproszczony schemat blokowy obliczeń modelu statystycznego przepływu ciepła przez przegrodę z roślinnością (opracowanie własne)

Na podstawie wykresu obrazującego różnice między gęstością strumienia ciepła transportowanego przez warstwę roślinności a ścianę właściwą, które obliczone zostały na podstawie pomierzonych danych i modelu [13] (Wykres 19) dla natężenia  $I_t=0\text{W/m}^2$  zauważono zależność między wartością uzyskanych różnic a czasem trwania pomiarów. Podczas okresu pomiarowego wskaźnik ulistnienia  $LAI$  zmieniał się. Największa jego zmiana widoczna była w okresie od 19.11.2021 do 01.12.2021. W czasie około 40dni wskaźnik  $LAI$  sięgający około 2 zmienił się do  $LAI$  wynoszącego 0,05, co ukazuje Wykres 17. Na podstawie obserwacji określono wskaźnik ulistnienia, co zostało opisane w rozdziale 11.1 *Dane wejściowe i założenia*.

Pierwsze analizy wykazały zależność między medianą różnic gęstości strumienia ciepła transportowanego przez warstwę roślinności a ścianę, na której została ona zaimplementowana, uzyskanych na podstawie modelu [115] (punkty centralne) a wskaźnikiem ulistnienia  $LAI$ . W celu lepszego zobrazowania związku zestawiono mediany różnic gęstości strumienia ciepła dla różnych wartości  $LAI$ , z uwzględnieniem zakresów;  $0\div 1$ ;  $1\div 2$ ;  $2\div 3$ ;  $3\div 4$  (Wykres 21). Na podstawie analizy ocenić można znaczne (od  $11\text{W/m}^2$  do  $421\text{W/m}^2$ ) niedopasowanie modelu dla niskich wartości wskaźnika ulistnienia w zakresie  $0\div 1$ . W pozostałych przypadkach różnice między zbilansowaniem a osiągniętą medianą są mniejsze, ale nadal widoczne i wynoszą między  $-92\text{W/m}^2$  a  $-13\text{W/m}^2$ . W celu lepszego dopasowania modelu niezbędne było uwzględnienie zmiany wskaźnika ulistnienia.



Wykres 21 Różnice między uzyskaną medianą różnic gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą obliczona na podstawie modelu [13] (punkty centralne) z uwzględnieniem różnych zakresów  $LAI$  a natężeniem promieniowania słonecznego (opracowanie własne)



Uproszczony schemat wykonanych modyfikacji modelu [13] przedstawia Rysunek 14. Wszystkie modyfikacje bazują na dostępnych w literaturze matematycznych i empirycznych opisów zjawisk. Jedną z modyfikacji przyjętych w modelu statystycznym wymiany ciepła przez przegrodę z roślinnością jest wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję na powierzchniach przegród. Do analiz zastosowano wartości obliczone na podstawie wzoru (61) zawartego w literaturze [138]:

$$h_{vw} = 1,66 \cdot (T_{air} - T_{svw})^{\frac{1}{3}} \quad (61)$$

Modyfikacja (modyf. 1) pozwoliła na wstępne wygładzenie linii różnic gęstości strumienia ciepła, w szczególności dla wskaźnika ulistnienia *LAI* między 3 a 4.

Po wykonaniu modyfikacji stworzono macierz korelacji, która określiła zależności między zmiennymi, co zawiera Tabela 14. Analizy wykazały, że gęstość strumienia transportowanego ciepła przez warstwę roślinną po modyfikacji w głównej mierze zależy od grubości oraz wskaźnika ulistnienia zielonej ściany i od przepuszczalności promieniowania przez liście.

Tabela 14 Korelacje pomiędzy zmiennymi przyjętymi w modelu a gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności (na podstawie modyf. 1 modelu) dla  $\alpha = 0,05$ . Korelacje wyznaczone na bazie 29500 pomiarów (opracowanie własne w programie Statistica)

Zmienna	R	R <sup>2</sup>
<i>T<sub>air</sub></i>	-0,496	0,246
<i>RH<sub>air</sub></i>	0,171	0,029
<i>T<sub>svw</sub></i>	-0,545	0,297
<i>D</i>	-0,796	0,634
<i>V<sub>air</sub></i>	0,089	0,008
<i>It</i>	-0,623	0,388
<i>T<sub>dewpoint</sub></i>	0,132	0,017
<i>ε<sub>sky</sub></i>	-0,623	0,388
<i>eS(T<sub>air</sub>)</i>	-0,463	0,214
<i>LAI</i>	-0,807	0,652
<i>τ</i>	0,823	0,677

Wykonano także macierze korelacji dla powyższych danych z uwzględnieniem wskaźnika *LAI* (Tabela 15). Siła zależności między gęstością strumienia transportowanego ciepła przez roślinność a poszczególnymi parametrami dla poszczególnych zakresów wskaźnika ulistnienia różni się. Największa korelacja zarówno przed, jak i po modyfikacji modelu [13] występuje

między natężeniem promieniowania słonecznego, w zależności od  $LAI$  wynosi ona od 0,342 do 0,982. Istotnych korelacji między gęstością strumienia transportowanego ciepła przez roślinność a poszczególnymi parametrami wprowadzonymi do obliczeń jest więcej, co widać na podstawie danych, które zawiera Tabela 15, są nimi m.in. temperatura powierzchni zewnętrznej przegrody, grubość warstwy roślinnej oraz wskaźnik ulistnienia.

Tabela 15 Korelacje pomiędzy zmiennymi przyjętymi w modelu a gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności (na podstawie modyf. 1 modelu) dla  $\alpha = 0,05$ . Korelacje wyznaczono na bazie 29500 pomiarów oraz poszczególnych wartości  $LAI$  (opracowanie własne w programie Statistica)

Zmienna	$LAI = 0\div 1$		$LAI = 1\div 2$		$LAI = 2\div 3$		$LAI = 3\div 4$	
	R	R <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup>
$T_{air}$	0,081	0,007	-0,011	0,000	0,161	0,026	0,023	0,001
$RH_{air}$	-0,400	0,160	-0,336	0,113	-0,490	0,240	-0,217	0,047
$T_{swv}$	-0,010	0,000	0,018	0,000	0,367	0,135	0,357	0,127
$D$	-0,173	0,030	-0,438	0,192	0,067	0,004	-0,049	0,002
$V_{air}$	-0,024	0,001	0,037	0,001	-0,161	0,026	-0,126	0,016
$T_{dewpoint}$	-0,095	0,009	-0,301	0,091	-0,092	0,008	-0,258	0,067
$It$	0,982	0,964	0,928	0,861	0,850	0,723	0,585	0,342
$\varepsilon_{sky}$	-0,095	0,009	-0,300	0,090	-0,092	0,008	-0,258	0,067
$es(T_{air})$	0,073	0,005	-0,015	0,000	0,184	0,034	0,046	0,002
$LAI$	-0,224	0,050	-0,443	0,196	0,060	0,004	-0,056	0,003
$\tau$	0,224	0,050	0,439	0,193	-0,057	0,003	0,052	0,003

W kolejnym kroku sprawdzono obliczenia uwzględniające proces transpiracji roślinności. W literaturze [13,131,154] wskazano, że temperatura powierzchni liści zazwyczaj różni się od temperatury otaczającego powietrza. Wpływ na to mają procesy fizjologiczne roślin, jak i czynniki zewnętrzne, które odzwierciedlane są poprzez proces transpiracji. Im jest ona większa, tym schładzanie roślin w okresie letnim jest intensywniejsze. Proces ten powoduje zużywanie znacznej ilości ciepła przez roślinność, na poziomie około 2,5MJ/kg [154].

W modelu [13] temperaturę powierzchni roślin obliczono na podstawie równania (20) (modyf. 2). Należy mieć na uwadze fakt, że parametry powietrza zewnętrznego mają decydujący wpływ na wartość temperatury liści. Dotyczy to w szczególności parametrów takich jak: temperatura, wilgotność względna, prędkość powietrza oraz natężenie promieniowania słonecznego. Wstępnie do modyfikacji zastosowano równanie (62) opisujące temperaturę warstwy roślinnej [155], uwzględnia temperaturę powietrza zewnętrznego, jak i opory szparkowy ( $r_s$ ) oraz aerodynamiczny liści ( $r_a$ ).

$$T_{leaf} = T_{air} + \frac{r_a \cdot It}{\rho_{air} \cdot c_{pair}} \cdot \frac{\gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right) - (e_s(T_{air}) - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (62)$$

Opór aerodynamiczny liści opisano wzorem (63) uwzględniającym prędkość powietrza [156].

$$r_a = \frac{208}{v_{air}} \quad (63)$$

W literaturze [13] wskazano, że typowy opór szparkowy liścia mieści się w zakresie 100÷500s/m. Do obliczeń przyjęto 300s/m. Niestety modyfikacja nie przyniosła oczekiwanych efektów, dlatego tego podejścia nie zastosowano w docelowej modyfikacji modelu.

Gates [131] w swoich rozważaniach podjął eksperymenty uwzględniające pomiary temperatury liści różnych roślin. Na ich podstawie wykazał, że temperatura liści była na ogół o 2°C÷4°C wyższa niż temperatura powietrza zewnętrznego podczas ciepłych pochmurnych dni. Dlatego kolejna próba modyfikacji modelu (modyf. 3) uwzględniała wyznaczenie temperatury liści na podstawie zmierzonych parametrów. W tym celu posłużono się metodami statystycznymi. Wykonano regresję wieloraką, a na jej podstawie określono zależność między parametrami powietrza zewnętrznego a temperaturą w warstwie roślinności (64), która mogłaby posłużyć jako dana wejściowa do modelu. Z uwagi na brak oczekiwanej poprawy nie zastosowano wyliczonych w poniższy sposób wartości temperatur do modyfikacji modelu.

$$T_{leaf} = 0,59 \cdot T_{air} + 0,41 \cdot T_{svw} - 0,04 \cdot RH_{air} + 0,08 \cdot V_{air} + 3,82 \quad (64)$$

Literatura [157] wskazuje także na możliwość wyznaczenia długofalowego promieniowania za pośrednictwem innych zależności niż te zawarte w równaniu (12). Zhao C. i inni [157] wskazują, że możliwe jest wyznaczenie promieniowania długofalowego na podstawie zestawu zależności pomiędzy tymi samymi parametrami co w równaniu (12), lecz uwzględniając przy tym promieniowanie padające i odbite. Równanie (65) opisane zostało zależnością na podstawie prawa Kirchoffa.

$$LR_{vwn} = \varepsilon \cdot LR_{vw} - LR_e \quad (65)$$

Obliczenia na podstawie wyrażenia (65) wartości [157] (modyf. 4) nie ukazały pożądanych efektów podczas modyfikacji modelu, dlatego nie zastosowano ich do dalszych prac.

Na podstawie literatury [132] wskazano, że możliwe jest wyznaczenie temperatury czystego nieba za pośrednictwem innych wyrażań niż z zależności Straube'a i Burnetta (równanie (30)). Uwzględniają one różne metody estymacji promieniowania podczerwonego. Należą do nich modele empiryczne, szczegółowe oraz pochodzące z innych dokumentów np. norm [158]. Podczas wykonanych modyfikacji modelu bazowego [13] (modyf. 5) wykazano, że wyznaczanie temperatury nieba na podstawie zależności (66) ma znaczenie podczas opisu gęstości strumienia transportowanego ciepła przez zieloną ścianę, choć autorzy [13] wskazali małą wrażliwość tego parametru na dane wyjściowe.

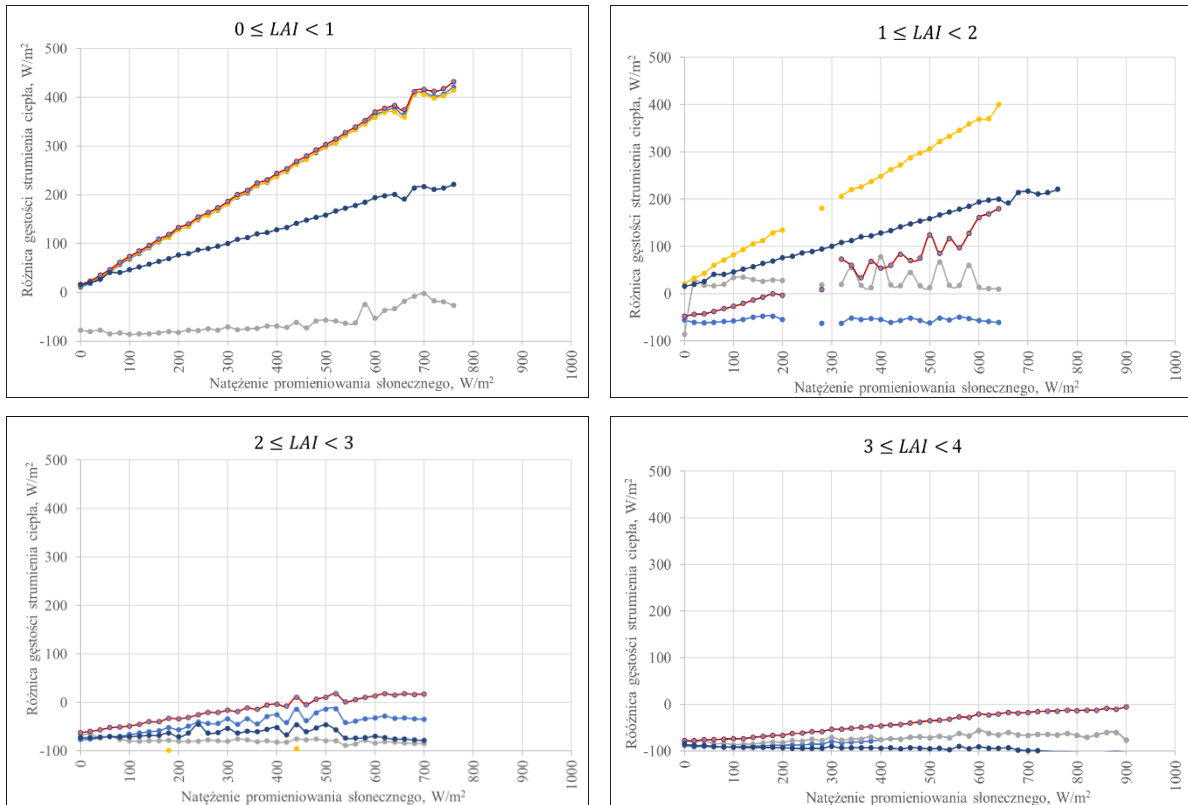
$$T_{sky} = T_{air} \cdot \varepsilon_{sky}^{0,25} \quad (66)$$

Analizy przeprowadzone na podstawie wyników uzyskanych poprzez zastosowaną modyfikację modelu ukazały zmiany sił powiązań między gęstością strumienia transportowanego ciepła przez zastosowaną na przegrodzie roślinność a poszczególnymi parametrami modelu, Tabela 16. W przypadku niższych wartości wskaźnika ulistnienia najwyższe determinanty wyznaczono dla natężenia promieniowania słonecznego. Natomiast dla  $LAI$  powyżej 2 zależności między gęstością strumienia ciepła a prędkością oraz temperaturą powietrza zewnętrznego okazały się być silniejsze.

Tabela 16 Korelacje pomiędzy zmiennymi przyjętymi w modelu a gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności (na podstawie modyf. 5 modelu) dla  $\alpha = 0,05$ . Korelacje wyznaczone na bazie 29500 pomiarów oraz poszczególnych wartości  $LAI$  (opracowanie własne w programie Statistica)

Zmienna	$LAI = 0 \div 1$		$LAI = 1 \div 2$		$LAI = 2 \div 3$		$LAI = 3 \div 4$	
	R	R <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup>
$T_{air}$	0,131	0,017	-0,273	0,075	-0,385	0,148	-0,744	0,554
$RH_{air}$	-0,387	0,150	-0,200	0,040	0,034	0,001	0,539	0,290
$T_{sww}$	0,039	0,002	-0,190	0,036	-0,063	0,004	-0,409	0,167
$D$	-0,298	0,089	-0,684	0,468	-0,147	0,022	-0,243	0,059
$V_{air}$	-0,031	0,001	-0,148	0,022	-0,554	0,307	-0,596	0,355
$T_{dewpoint}$	-0,060	0,004	-0,493	0,243	-0,087	0,008	-0,134	0,018
$I_t$	0,938	0,881	0,772	0,595	0,167	0,028	-0,538	0,289
$\varepsilon_{sky}$	-0,060	0,004	-0,493	0,243	-0,087	0,008	-0,134	0,018
$es(T_{air})$	0,127	0,016	-0,277	0,077	-0,374	0,140	-0,729	0,532
$LAI$	-0,372	0,138	-0,694	0,481	-0,154	0,024	-0,281	0,079
$\tau$	0,372	0,138	0,691	0,477	0,151	0,023	0,275	0,076

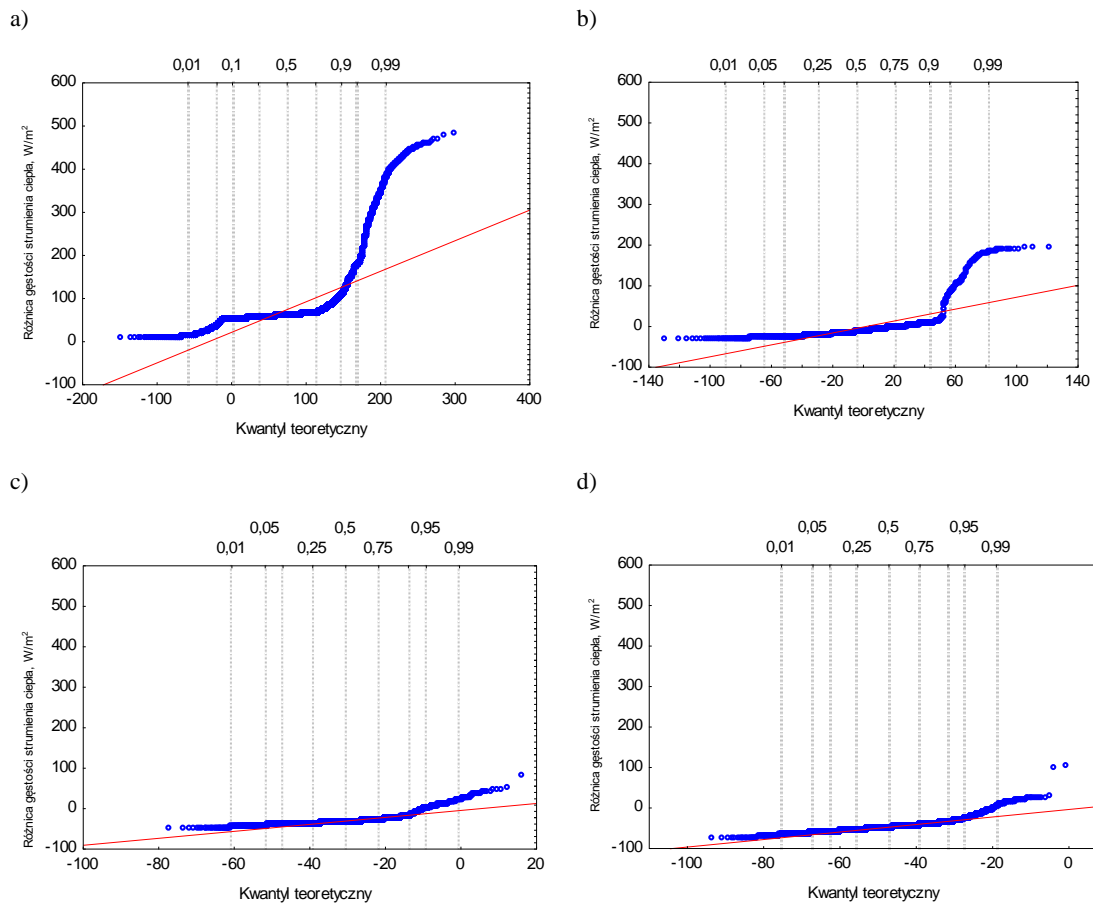
Decyzje o implementacji lub odrzuceniu danej modyfikacji modelu oparte były o analizy wykresów różnic gęstości strumienia ciepła dla przegrody z warstwą roślinności, co przedstawia Wykres 22.



Wykres 22 Różnice między uzyskaną medianą różnic gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą obliczona na podstawie modelu [13] (punkty centralne) z uwzględnieniem różnych zakresów LAI a natężeniem promieniowania słonecznego po modyfikacjach, niebieski – model bazowy, granatowy – modyf. 1, żółty – modyf. 2, czerwony – modyf. 3, zielony – modyf. 4, szary – modyf. 5 (opracowanie własne)

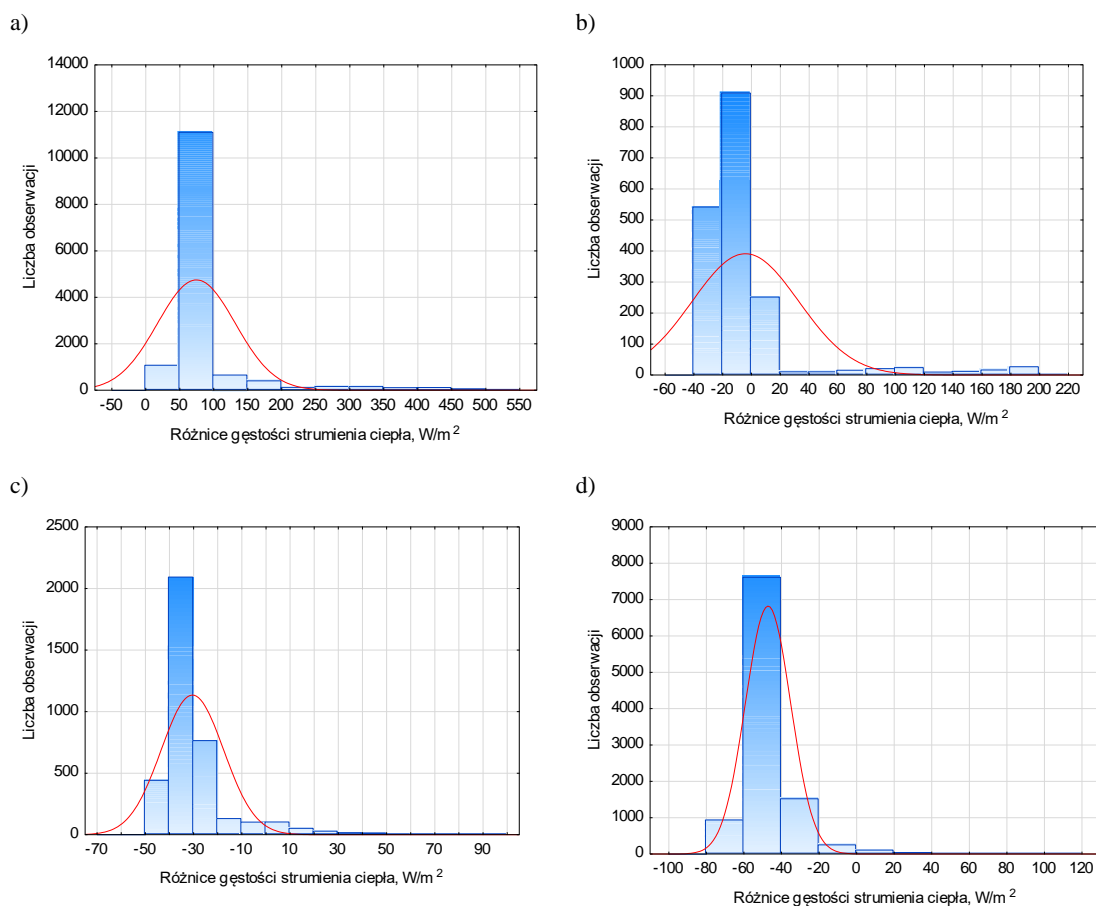
Sprawdzono stopień dopasowania modelu po modyfikacjach do obserwacji [159]. W tym celu porównano empirycznie wykresy kwantylowe, co przedstawia Wykres 23. Analizy wykonano z uwzględnieniem poziomu ufności 95%. Punkty zestawione na wykresach przedstawiających wartość obserwowaną do kwantylu teoretycznego nie układają się wzdłuż prostej i znacznie odbiegają od wartości  $0\text{W/m}^2$ . Świadczyć to może o niewłaściwym dopasowaniu modelu do pomierzonych danych. Z uwagi na wyniki analiz statystycznych, które wskazały na niewystarczający stopień dopasowania modelu do obserwacji, wykonano modyfikacje empiryczne. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że mogą one nie być uniwersalnym rozwiązaniem do określenia gęstości transportowanego ciepła przez zieloną ścianę. Związane być to może z typem roślinności zastosowanej na przegrodach znajdujących

się w różnych lokalizacjach, uwzględniając przy tym panujący klimat, jak i implementację w kierunku danej strony świata, czy też jej otoczenia.



Wykres 23 Wykres kwantylowy dla danych różnic gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą (na podstawie modyf. 5 modelu) na poziomie ufności 95% a)  $0 \leq LAI < 1$ , b)  $1 \leq LAI < 2$ , c)  $2 \leq LAI < 3$ , d)  $3 \leq LAI < 4$  (opracowanie własne w programie Statistica)

Na podstawie wyników otrzymanych z obliczeń oraz obserwacji przyjęto, że gęstość strumienia ciepła przyjmuje rozkład normalny dla każdego z zakresów wskaźnika ulistnienia fasady wykonanej z roślinności. Wykonano analizy rozkładów normalnych wyników dotyczących różnic gęstości strumienia ciepła transportowanego przez zieloną ścianę, które przedstawiono na wykresie (Wykres 24). Zestawiono wykresy rozkładu obserwowanego (niebieskie słupki obserwacji) i oczekiwanego (czerwona krzywa) dla poszczególnych grup wyników:  $0 \leq LAI < 1$ ,  $1 \leq LAI < 2$ ,  $2 \leq LAI < 3$ ,  $3 \leq LAI < 4$ .



Wykres 24 Badanie rozkładu normalnego dla różnic gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą dla a)  $0 \leq LAI < 1$ , b)  $1 \leq LAI < 2$ , c)  $2 \leq LAI < 3$ , d)  $3 \leq LAI < 4$  (opracowanie własne w programie Statistica)

Na podstawie przeprowadzonych działań statystycznych wyznaczono parametry empiryczne poszczególnych członów równania. Uznano, że rodzina danych eksperymentalnych jest wystarczająco liczna (około 29 500 pomiarów) i „elastyczna”, że na ich podstawie możliwe jest właściwe określenie gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności.

Dla każdego zakresu wskaźnika ulistnienia (przedziały  $0 \leq LAI < 1$ ,  $1 \leq LAI < 2$ ,  $2 \leq LAI < 3$ ,  $3 \leq LAI < 4$ ) za pośrednictwem regresji oszacowano wartości parametrów  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  oraz  $m_4$  (równania (67)÷(70)).

$$m_1 = \begin{cases} 0,01 & \text{dla } 0 \leq LAI < 1 \\ -0,10 & \text{dla } 1 \leq LAI < 2 \\ -0,40 & \text{dla } 2 \leq LAI < 3 \\ -0,41 & \text{dla } 3 \leq LAI < 4 \end{cases} \quad (67)$$

$$m_2 = \begin{cases} -1,18 & \text{dla } 0 \leq LAI < 1 \\ 0,88 & \text{dla } 1 \leq LAI < 2 \\ -0,34 & \text{dla } 2 \leq LAI < 3 \\ 0,17 & \text{dla } 3 \leq LAI < 4 \end{cases} \quad (68)$$

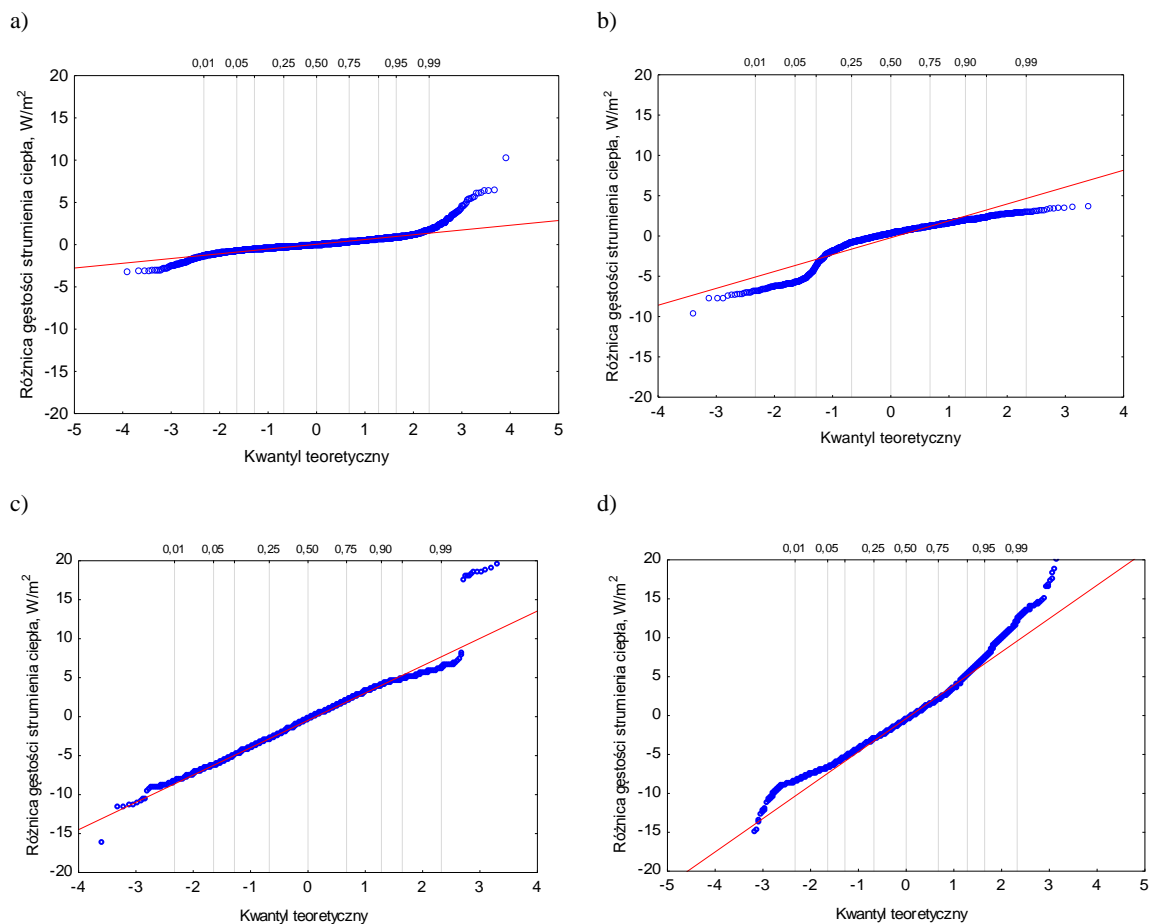
$$m_3 = \begin{cases} 0,73 & \text{dla } 0 \leq LAI < 1 \\ -0,28 & \text{dla } 1 \leq LAI < 2 \\ -0,42 & \text{dla } 2 \leq LAI < 3 \\ -0,19 & \text{dla } 3 \leq LAI < 4 \end{cases} \quad (69)$$

$$m_4 = \begin{cases} 16,38 & \text{dla } 0 \leq LAI < 1 \\ 0,57 & \text{dla } 1 \leq LAI < 2 \\ 2,68 & \text{dla } 2 \leq LAI < 3 \\ 3,02 & \text{dla } 3 \leq LAI < 4 \end{cases} \quad (70)$$

#### *Weryfikacja zmodyfikowanego modelu*

Weryfikacja stworzonego modelu statystycznego wykazała różnice między punktami centralnymi (medianami) otrzymanych z obliczeń a poziomem transportu ciepła od 0W/m<sup>2</sup> do 6W/m<sup>2</sup>. Wyliczono średni błąd wynoszący 10% wyliczonej wartości, co uznano za dopuszczalny. Wykonano także wykresy kwantylowe ukazujące zależność między wartością obserwowaną a kwantylem teoretycznym. Dla wszystkich czterech zakresów wskaźnika ulistnienia widoczny jest liniowy, bądź bliski liniowemu związek między powyższymi dwoma parametrami.





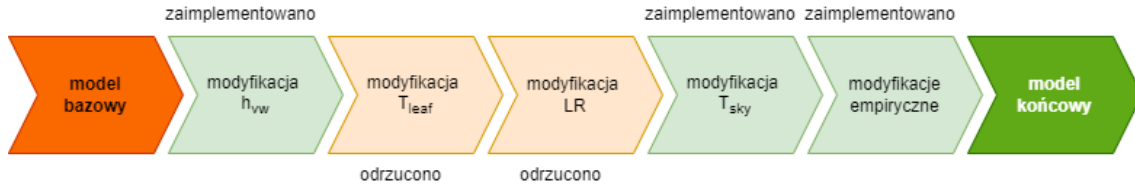
Wykres 25 Wykres kwantylowy dla różnic gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą uzyskanych na podstawie modyfikacji oraz wprowadzonych parametrów empirycznych modelu na poziomie ufności 95% a)  $0 \leq LAI < 1$ , b)  $1 \leq LAI < 2$ , c)  $2 \leq LAI < 3$ , d)  $3 \leq LAI < 4$  (opracowanie własne w programie Statistica)

Zaproponowane modyfikacje do modelu bazowego opisanego w literaturze [13] dobrze odwzorowują transport strumienia ciepła dla przegrody z warstwą roślinności w okresie zimnym, który wyliczony został na podstawie danych pomiarowych zebranych podczas badań terenowych. Z uwagi na wprowadzone dane empiryczne nie można w pełni stwierdzić, że model będzie uniwersalnym narzędziem określającym transport ciepła przez roślinność w analizowanych warunkach klimatycznych dla innych rozwiązań zielonej ściany niż opisane w niniejszej dysertacji. W tym celu niezbędna byłaby jego weryfikacja na nowych danych pomiarowych.

### *Przedstawienie modelu końcowego*

Rysunek 13 ukazuje uproszczony schemat przeprowadzonych modyfikacji modelu. Analizy oraz weryfikacje wykonano na bazie około 29 500 danych. Część z nich tj. zmiany związane z wyznaczeniem współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję na

powierzchniach ścian oraz obliczaniem temperatury nieboskłonu zaimplementowano do modelu [13].



Rysunek 13 Uproszczony schemat przeprowadzonych modyfikacji (opracowanie własne)

Na podstawie wykonanych analiz oraz modyfikacji statystycznych (Rysunek 13) opisano transport ciepła roślinność dla obiektu w okresie zimnym, w którym zrealizowano badania:

$$SR_{vw} + LR_{vw} + XR + C_{vw} \quad (71)$$

$$SR_{vw} = m_1 \cdot I_t \cdot \alpha_{wall} \cdot \tau \quad (72)$$

$$\tau = \exp(-\kappa \cdot LAI) \quad (73)$$

$$LR_{vw} = m_2 \cdot \tau \cdot \varepsilon_{sky} \cdot \sigma \cdot F_{sky} \cdot (T_{sky}^4 - T_{svw}^4) + m_2 \cdot \tau \cdot \varepsilon_{wall} \cdot \varepsilon_{gr} \cdot \sigma \cdot F_{gr} \cdot (T_{gr}^4 - T_{svw}^4) \quad (74)$$

$$T_{sky} = T_{air} \cdot \varepsilon_{sky}^{0,25} \quad (75)$$

$$XR = m_3 \cdot (1 - \tau) \cdot \frac{\varepsilon_{leaf} \cdot \varepsilon_{wall} \cdot \sigma}{(\varepsilon_{leaf} + \varepsilon_{wall} - \varepsilon_{leaf} \cdot \varepsilon_{wall})} \cdot (T_{svw}^4 - T_{leaf}^4) \quad (76)$$

$$T_{leaf} = T_{air} + \frac{\gamma'}{\frac{\Delta}{P_{air}} + \gamma'} \cdot \left[ \frac{Q_{leaf}}{g_c \cdot c_{pair}} - \frac{(e_s(T_{air})) - e_a}{P_{air} \cdot \gamma'} \right] \quad (77)$$

$$\gamma' = \frac{\gamma \cdot g_c}{g_v} \quad (78)$$

$$g = g_v + g_{bh} \quad (79)$$

$$g_{bh} = 1,4 \cdot \left( 0,135 \cdot \sqrt{\frac{V_{air}}{D}} \right) \quad (80)$$

$$g_{bv} = 1,4 \cdot \left( 0,147 \cdot \sqrt{\frac{V_{air}}{D}} \right) \quad (81)$$

$$g_v = \frac{0,5 \cdot g_{asul} \cdot g_{bv}}{g_{asul} + g_{bv}} + \frac{0,5 \cdot g_{asll} \cdot g_{bv}}{g_{asll} + g_{bv}} \quad (82)$$

$$\Delta = \frac{4217 \cdot e_s(T_{air})}{(240,97 + T_{air})^2} \quad (83)$$

$$Q_{leaf} = I_t \cdot \alpha_{leaf} + \varepsilon_{leaf} \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_{sky}^4 + T_{gr}^4) - \varepsilon_{leaf} \cdot \sigma \cdot (T_{air})^4 \quad (84)$$

$$e_s(T) = 0,611 \cdot \exp \frac{17,502 \cdot T_{air}}{(T_{air} + 240,97)} \quad (85)$$

$$e_a = e_s(T_{air}) \cdot RH_{air} \quad (86)$$

$$F_{gr} = 0,5 \cdot (1 - \cos\theta) \quad (87)$$

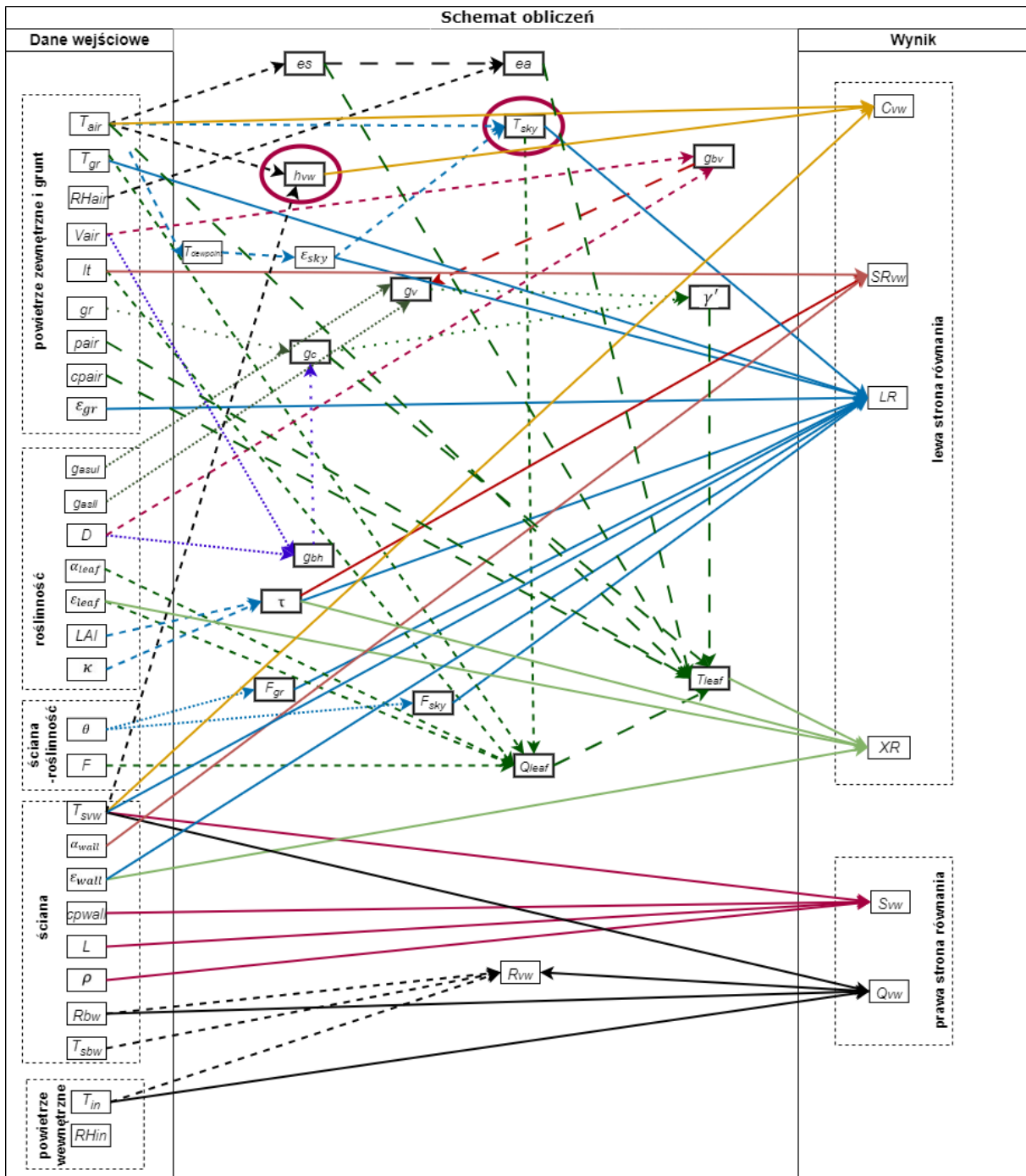
$$F_{sky} = 0,5 \cdot (1 - \cos\theta) \quad (88)$$

$$Q_{vw} = \frac{T_{svw} - T_{in}}{R_{bw}} \quad (89)$$

$$C_{vw} = m_4 \cdot 1,66 \cdot (T_{air} - T_{svw})^{\frac{1}{3}} \cdot (T_{air} - T_{svw}) \quad (90)$$

Powyższe wyrażenia nie uwzględniają wyznaczenia oporu cieplnego przegrody, na której zastosowana została roślinność. Przyjęto, że zostanie on wyliczony na podstawie obserwacji

i dostępnych danych technicznych. Natomiast parametry  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  oraz  $m_4$  przyjmują wartości empiryczne, jak w równaniach (67)÷(70).



Rysunek 14 Schemat obliczeń wymiany ciepła przez przegrodę z roślinnością z zastosowanymi modyfikacjami do modelu (opracowanie własne na podstawie [13])

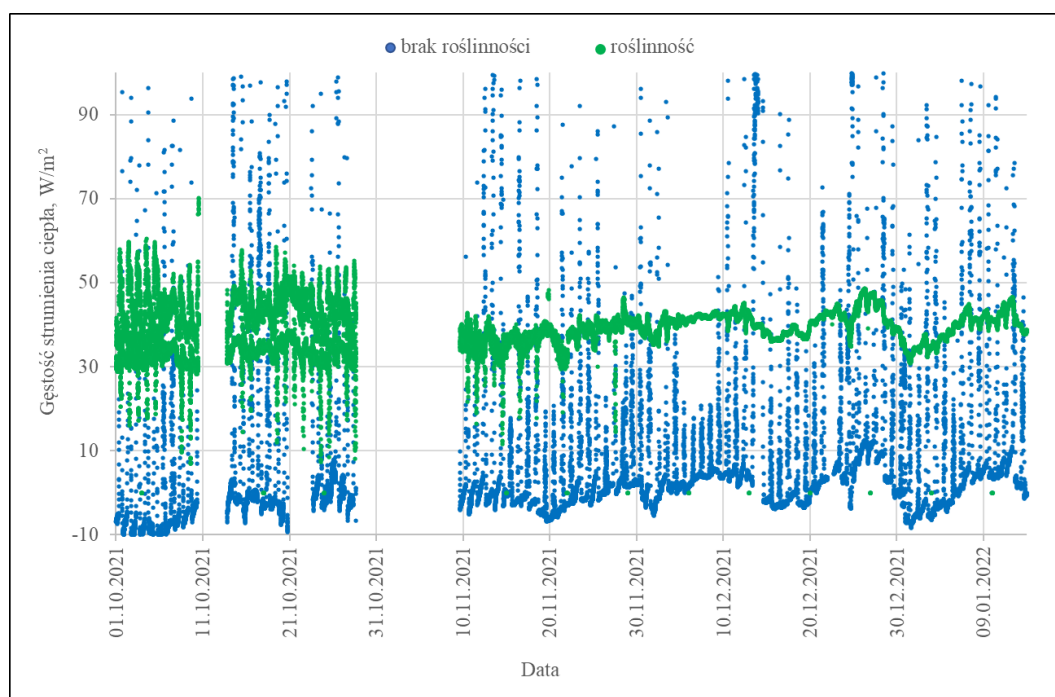
Wykonane modyfikacje obliczeń modelu matematycznego [13] dotyczące gęstości strumienia transportowanego ciepła przez zastosowaną na przegrodzie roślinność oraz zależności między zmiennymi zależnymi i niezależnymi przedstawiono na schemacie

(Rysunek 14). Czerwonym obramowaniem oznaczono wyrażenia, które zostały zmodyfikowane na podstawie dostępnej literatury, z uwagi na ich pozytywny wpływ w dopasowaniu obserwacji do modelu.

#### 11.4. Ciepło i jego transport do powierzchni zewnętrznej przegrody

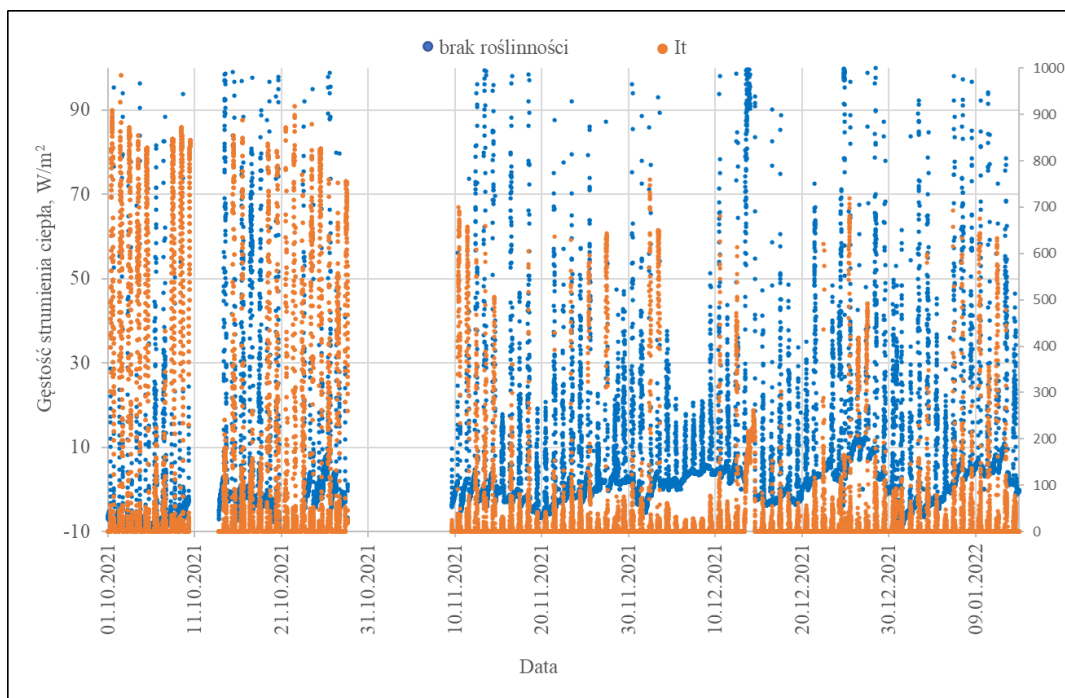
Warstwa roślinności, jak wskazuje literatura [3–9], ma wpływ na transport ciepła przez przegrody. W zależności od grubości warstwy roślinnej oraz wskaźnika ulistnienia zielonej ściany jej izolacyjność może być różna.

Wykonano porównanie gęstości strumienia ciepła docierającego do właściwej przegrody budynku z roślinnością i bez niej w okresie zimnym obliczonych na podstawie pomierzonych danych i modyfikacji modelu (Rozdział 11.3 *Modyfikacja istniejącego modelu matematycznego*), Wykres 26. Mediana gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności wyniosła  $38,2\text{W/m}^2$ , natomiast w przypadku jej braku  $0,6\text{W/m}^2$ . Dzięki roślinności, która w okresie zimnym utrzymuje wyższe temperatury w obszarze ściany, następuje bardziej intensywna wymiana ciepła pomiędzy powietrzem zewnętrznym a powietrzem w bliskim otoczeniu przegrody niż, gdy zieleń nie została zastosowana. Wnioskować można, że zielona ściana blokuje transport ciepła z otoczenia budynku, dzięki czemu energia niezbędna do ogrzania obiektu w celu utrzymania komfortowych warunków zostaje zredukowana.



Wykres 26 Gęstości strumienia ciepła docierającego do właściwej przegrody budynku przez warstwę roślinności i w przypadku jej braku obliczone na podstawie pomierzonych danych i zmodyfikowanego modelu (opracowanie własne)

W celu ustalenia przyczyny pików związanych ze wzrostem gęstości strumienia ciepła do przegrody bez roślinności zestawiono jego wartość do natężenia promieniowania słonecznego w danym okresie (Wykres 27). Na tej podstawie przypuszczać można, że okresowo występujące piki wzrostu gęstości strumienia ciepła są związane z chwilowym nagrzewaniem się warstwy powietrza w obszarze przegrody spowodowanym bezpośrednim działaniem promieniowania słonecznego na czujnik. W przypadku warstwy roślinności na ścianie zewnętrznej wpływ promieniowania na wahania gęstości strumienia ciepła jest zdecydowanie mniejszy, model wskazuje mniejszą wrażliwość ten parametr. Przypuszcza się, że ograniczenie bezpośredniego działania promieniowania słonecznego na przegrodę może korzystnie wpłynąć na ograniczenie degradacji przegrody zewnętrznej.



Wykres 27 Gęstości strumienia ciepła docierającego do właściwej przegrody budynku bez roślinności obliczone na podstawie pomierzonych danych wprowadzonych do modelu [13] (opracowanie własne)

W celu dokładniejszego określenia wpływu danych wprowadzonych do modelu, w szczególności wpływu danych meteorologicznych (rejestrowanych w różnych lokalizacjach) na otrzymane wyniki, niezbędne są bardziej szczegółowe analizy, co może zostać poruszone w kolejnych opracowaniach.



## 12. Modelowanie warunków w WUFI Plus

Wymiana ciepła i masy w elementach obudowy budynku jest zagadnieniem obejmującym wielofazowy przebieg zjawisk higrotermicznych. Proste modele matematyczne, jak np. metoda Glasera, nie są w stanie przedstawić ich z odpowiednią dokładnością, dlatego norma *PN-EN ISO 13788* [160] dopuszcza stosowanie programów komputerowych do wspomaganie obliczeń, które opierają się na złożonych modelach transportu ciepła i masy. Jednym z nich jest *WUFI* (szerzej opisany w rozdziale 8.2 *Model termiczno-wilgotnościowy*), który stworzony został przez Instytut Fraunhofera.



Rysunek 15 Model 3D bryły budynku objętego opracowaniem (opracowanie własne w programie *SketchUp*)

W celu zamodelowania wymiany ciepła i masy oraz komfortu termicznego w budynku na podstawie zgromadzonych informacji wykonano model 3D bryły w programie *SketchUp*, Rysunek 15. Budynek podzielono na strefy uwzględniające poszczególne pomieszczenia, kondygnacje (piwnica, parter, piętro, poddasze) oraz projektowaną temperaturę w pomieszczeniach (nieogrzewane, 20°C, 24°C). Model bryły 3D zaimplementowano do *WUFI Plus*. Modelowanie warunków wykonano w pomieszczeniu, w którym realizowano pomiary długoterminowe (salon).

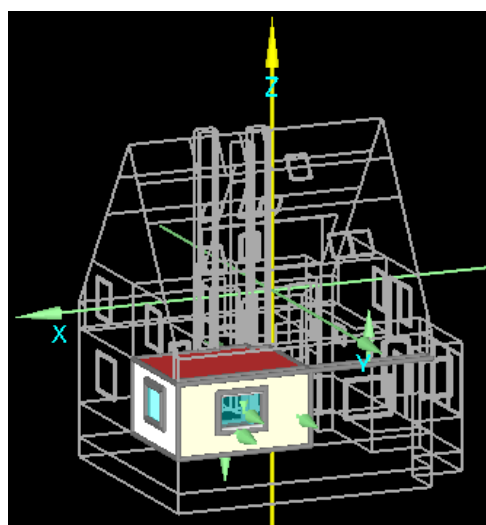
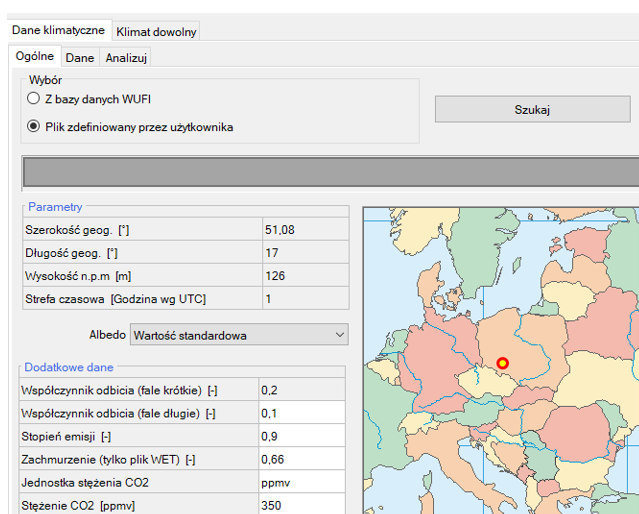
### 12.1. Założenia do obliczeń

W celu uzyskania jak najbardziej dokładnych wyników kalkulacji w *WUFI Plus* zdefiniowano warunki brzegowe oraz podstawowe parametry obliczeń, m.in.:

- klimat zewnętrzny,
- klimat wewnętrzny,
- właściwości materiałów konstrukcyjnych,
- okres wykonywania symulacji
- krok czasowy.

Jest to konieczne ze względu na wpływ i oddziaływanie na poszczególne elementy i procesy w budynku oraz z uwagi na występowanie sprzężeń zwrotnych. Założono higrotermiczny tryb symulacji z określonymi warunkami początkowymi. Obliczenia wykonano z wysoką dokładnością dla okresu między 01.10.2021 a 14.01.2022 w 1-godzinnym kroku czasowym. Ustalono 1-dniowy okres inicjalizacji.

Zmiany temperatury powietrza, jego wilgotności, natężenie promieniowania słonecznego, a także zacinające opady mają wpływ na przemiany oraz transport ciepła i masy w przegrodzie. Warunki klimatu wpływając na parametry powietrza w pomieszczeniu, oddziałują także na komfort termiczny w budynkach. Dlatego niezbędne jest określenie klimatu zewnętrznego w lokalizacji, w której znajduje się obiekt objęty badaniami. W oprogramowaniu *WUFI Plus* możliwe jest przyjęcie warunków meteorologicznych z podłączonej do niego bazy danych lub z pliku zdefiniowanego przez użytkownika, co przedstawia Rysunek 16. Należy pamiętać, że niepożądane efekty związane z zawilgoceniem przegród budowlanych zazwyczaj występują podczas ekstremalnych warunków pogodowych [133].



Rysunek 16 Fragment okna programu *WUFI Plus* opisujący dane klimatyczne oraz symulowana strefa budynku objętego analizą (opracowanie własne w *WUFI Plus*)



Na potrzeby niniejszego opracowania przyjęto i zaimplementowano dane z oprogramowania *Meteonorm* dla miasta Wrocław. Oprogramowanie opiera się na danych klimatycznych z okresu 1999-2015 dotyczących promieniowania oraz 2000-2019 dla temperatury, temperatury punktu rosy, prędkości wiatru oraz sumy opadów [161]. Najbliższe stacje pomiarowe dla obiektu to Wrocław-Strachowice, Legnica Bartoszów, Opole. Niepewności pomiarowe dla poszczególnych parametrów wynoszą 0,5°C dla temperatury powietrza oraz 5% dla promieniowania.

Tabela 17 Porównanie parametrów klimatu zewnętrznego dla *Meteonorm* oraz danych zarejestrowanych na stanowisku badawczym na budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej (opracowanie własne na podstawie zgromadzonych danych)

Parametr	Dane ze stanowiska na budynku			Dane z <i>Metonorm</i>		
	C-6 PWr			(dane średniomiesięczne z danych archiwalnych)		
	min	max	średnia	min	max	średnia
Temperatura powietrza, °C	-5,1	19,0	5,6	-0,1	10,0	4,3
Wilgotność względna powietrza, %	45,5	100,0	91,3	77,0	100,0	79,5
Prędkość powietrza, m/s	0,1	6,2	1,4	3,0	3,7	3,4

Porównano dane klimatyczne pochodzące ze stanowiska zlokalizowanego na budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej z danymi uzyskanymi z programu. Z uwagi na zbyt duże rozbieżności w danych (średniej temperatury powietrza 1,3 °C, wilgotności względnej 11,8% i prędkości powietrza 2,0m/s), okres ich uśredniania (dane z jednego roku w odniesieniu do kilkunastu lat) oraz konieczność uzupełnienia ich m.in. o kierunek wiatru i ilość opadów, danych pomiarowych nie zastosowano podczas obliczeń w *WUFI Plus*.

Symulowaną strefą w budynku było główne pomieszczenie budynku - salon, w którym przeprowadzono także obserwacje długoterminowe. Jego powierzchnia to 18,6m<sup>2</sup>. Projektową temperaturę w pomieszczeniu przyjęto jako początkową równą 20°C. Wilgotność względną na początku pomiarów opisano wartością 55%. Pozostałe pomieszczenia i części domu określono jako strefy sąsiednie oraz pozostałe. Każde z nich, z wyjątkiem piwnicy, przyjęto jako pomieszczenia ogrzewane, zgodnie z temperaturą projektową [162].

Bryłę budynku poddanego analizie wykonano na podstawie wykonanych oględzin, rozmów z mieszkańcami, projektu budynku oraz innych dokumentów, co było podstawą to określenia rodzajów materiałów budowlanych użytych w obiekcie objętych badaniami doświadczalnymi. W przypadku niniejszych badań najistotniejsze było wskazanie konstrukcji przegród w budynku, a w szczególności konstrukcji przegrody zewnętrznej oraz założeń dotyczących roślin je porastających. Do dalszych analiz przyjęto przegrody z pustką

powietrzną wypełnioną pianą poliuretanową oraz z pustką bez wypełnienia. Natomiast w przypadku zielonej ściany założono roślinność zimozieloną. Na podstawie literatury [141,163,164] określono parametry dotyczące warstwy roślinności, natomiast informacje dotyczące materiałów ścian zewnętrznych zaczerpnięto z katalogu *WUFI Plus*.

Podczas obliczeń uwzględniono mostki cieplne, jak i obciążenia wewnętrzne budynku. W kalkulacji zdefiniowano okresowe profile dnia, na podstawie których wyliczono zyski ciepła oraz wilgoci od użytkowników pomieszczenia. Do symulacji przyjęto te same zyski, zarówno dla budynku z warstwą roślinności, jak i bez niej. Założono brak osłabienia nocnego dotyczącego ogrzewania, a z uwagi na brak instalacji chłodzenia w rzeczywistym budynku wykluczono jej zastosowanie podczas symulacji. W budynku zastosowano wentylację grawitacyjną.

## **12.2. Wyniki symulacji**

Trójwymiarowy model bryły budynku objętego niniejszym opracowaniem ustanowiono jako bazę do symulacji. Zamodelowano warunki wewnętrzne w badanym pomieszczeniu i zużycie energii podczas użytkowania budynku z zieloną ścianą i porównano je z wynikami symulacji dla budynku o tej samej konstrukcji i warunkach brzegowych, lecz bez roślinności na ścianie zewnętrznej. Do obliczeń przyjęto warstwę roślinności zimozielonej o grubości 20cm. Analizy przeprowadzono dla okresu między 01.10.2021 a 14.01.2022, objęły one sumarycznie 2543 godziny, co stanowi 29% roku.

Na podstawie uzyskanych wyników symulacji w *WUFI Plus* zestawiono temperatury oraz zawartości wilgoci w przegrodach dla obu przypadków, z roślinnością i bez niej na przegrodach zewnętrznych budynku, Tabela 18. Należy zwrócić uwagę okres, dla którego wykonano symulację, obejmuje miesiące zimne z temperaturami zewnętrznymi bliskimi temperatury w budynku oraz od niej niższymi. W takim przypadku kierunek transportu ciepła może się zmieniać. Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli (Tabela 18) widoczny jest spadek średnich temperatur w poszczególnych warstwach ściany. Dla pierwszej warstwy cegły obniża się ona o  $2,7^{\circ}\text{C}$ , natomiast w warstwie muru za wypełnioną pustką różnica ta wynosi  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Ponadto, w przypadku braku izolacji termicznej w pustce powietrznej (Tabela 19), roślinność na przegrodach w większym stopniu niż w powyższym przykładzie, realizuje funkcję ograniczenia strat ciepła z budynku. Różnice między średnią temperaturą w warstwie muru z cegły po stronie zewnętrznej sięgają  $4,5^{\circ}\text{C}$ , natomiast w pustce powietrznej  $2,4^{\circ}\text{C}$ . Na

tej podstawie zauważyć można, że roślinność ogranicza wpływ warunków zewnętrznych na temperaturę w przegrodzie, podobnie jak izolacja wykonana z piany poliuretanowej.

Tabela 18 Średnie, minimalne oraz maksymalne wartości temperatury oraz zawartości wilgoci w danej warstwie ściany zewnętrznej z wypełnioną pustką powietrzną w okresie 01.10.2021-14.01.2022 (opracowanie własne w programie *WUFI Plus*)

Warstwa	Budynek z warstwą roślinności na ścianach			Budynek bez warstwy roślinności na ścianach		
	min	max	średni	min	max	średni
Temperatura, °C						
Tynk zewnętrzny	-21,9	8,9	-10,5	-27,8	3,4	-13,1
Cegła	-21,6	13,6	-9,3	-27,5	6,4	-12,0
Pustka powietrzna wypełniona pianą poliuretanową	-17,8	17,9	3,8	-22,8	17,5	2,5
Cegła	14,7	18,1	15,6	14,4	18,0	15,5
Tynk wewnętrzny	15,9	18,1	16,2	15,7	18,0	16,1
Zawartość wilgoci, kg/m <sup>3</sup>						
Tynk zewnętrzny	30,72	69,05	59,78	29,78	275,69	154,72
Cegła	4,72	9,24	5,06	4,44	32,02	5,32
Pustka powietrzna wypełniona pianą poliuretanową	1,24	6,00	2,49	1,19	6,24	2,62
Cegła	3,97	12,35	5,56	3,92	12,67	5,55
Tynk wewnętrzny	6,88	27,90	16,21	6,86	29,38	16,36

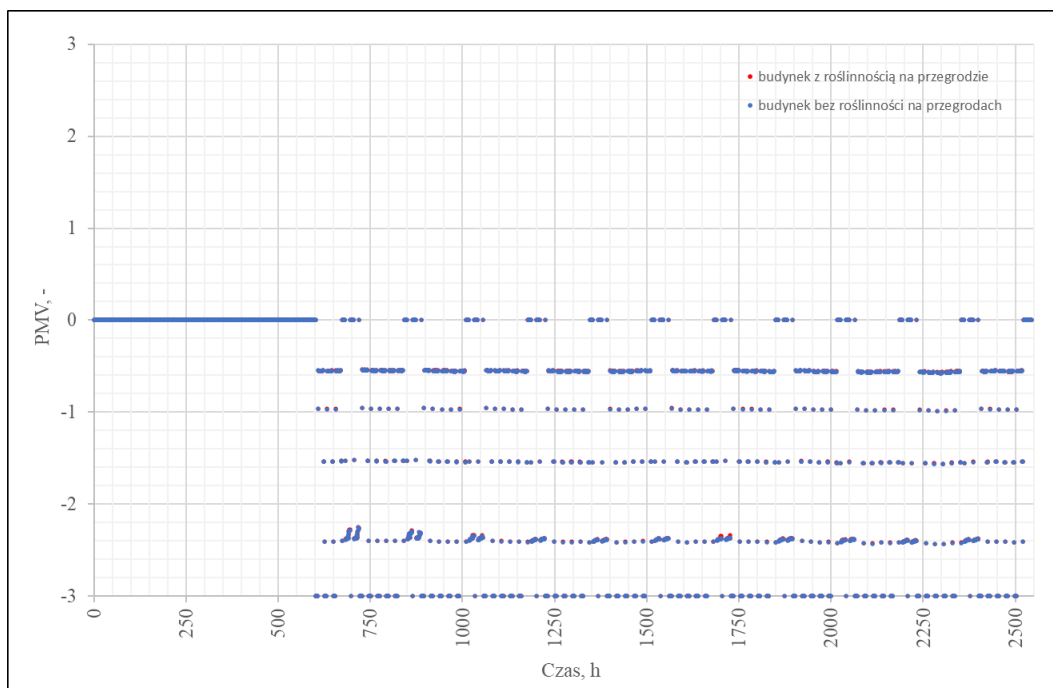
Podobne zjawisko obniżenia wartości danego parametru z uwagi na implementację zielonej ściany zaobserwowano dla zawartości wilgoci w danej warstwie przegrody (Tabela 18). W porównaniu do ściany z wypełnioną pustką powietrzną oraz z roślinnością na zewnętrznych partiach ściany zawartość wilgoci jest wyższa, dla cegły różnica wynosi 0,26kg/m<sup>3</sup>. Obniżenie zawartości wilgoci w przegrodzie dla ściany z warstwą roślinności zauważalne jest także dla budynku z niewypełnioną pustką powietrzną (Tabela 19).

Tabela 19 Średnie, minimalne oraz maksymalne wartości temperatury oraz zawartości wilgoci w danej warstwie ściany zewnętrznej z pustką powietrzną w okresie 01.10.2021-14.01.2022 (opracowanie własne w programie *WUFI Plus*)

Warstwa	Budynek z warstwą roślinności na ścianach			Budynek bez warstwy roślinności na ścianach		
	min	max	średni	min	max	średni
Temperatura, °C						
Tynk zewnętrzny	-17,8	9,0	-7,5	-26,6	3,6	-12,4
Cegła	-17,4	14,0	-5,4	-26,1	7,3	-9,9
Pustka powietrzna	-11,2	17,4	4,8	-18,0	16,3	2,4
Cegła	11,7	17,9	14,1	10,5	17,4	13,5
Tynk wewnętrzny	14,5	18,0	15,3	13,9	17,6	15,0
Zawartość wilgoci, kg/m <sup>3</sup>						
Tynk zewnętrzny	30,72	65,12	58,62	29,78	286,50	152,59
Cegła	4,78	82,28	6,63	4,44	110,20	6,91
Pustka powietrzna	0,14	77,61	2,56	0,09	146,59	3,07
Cegła	1,45	8,69	3,97	1,04	10,56	3,82
Tynk wewnętrzny	6,90	18,99	15,08	6,91	19,32	15,40

Wyniki symulacji wykazały ograniczenie transportu ciepła, dzięki warstwie roślinności. Dane dla pomieszczenia otoczonego ścianami zewnętrznymi z wypełnioną pustką powietrzną. W budynku bez warstwy roślinności zapotrzebowanie na energię do ogrzewania jednego pomieszczenia w badanym okresie wyznaczono na poziomie 580kWh. Natomiast w przypadku zastosowania zielonej ściany zmniejszyły się do 555kWh. Oszczędność wyniosła 25kWh w okresie 01.10.2021-14.01.2022. Dla rozwiązania, w którym izolacja termiczna w pustce powietrznej nie została zastosowana, różnicę w zapotrzebowaniu na energię określono na 122kWh (pomieszczenie ze ścianą bez warstwy roślinności 1003 kWh, 880 z zieloną ścianą) dla zakresu 105dni okresu zimnego. Powyższe wyniki ukazują pozytywny wpływ zastosowania roślinności na energochłonność budynku. W budynku bez zastosowanej izolacji redukcja energii niezbędnej na cele grzewcze wyniosła 12%, natomiast z budynku z wypełnioną pustką powietrzną zmniejszyła się o 4% dla pomieszczenia objętego symulacją w badanym okresie.

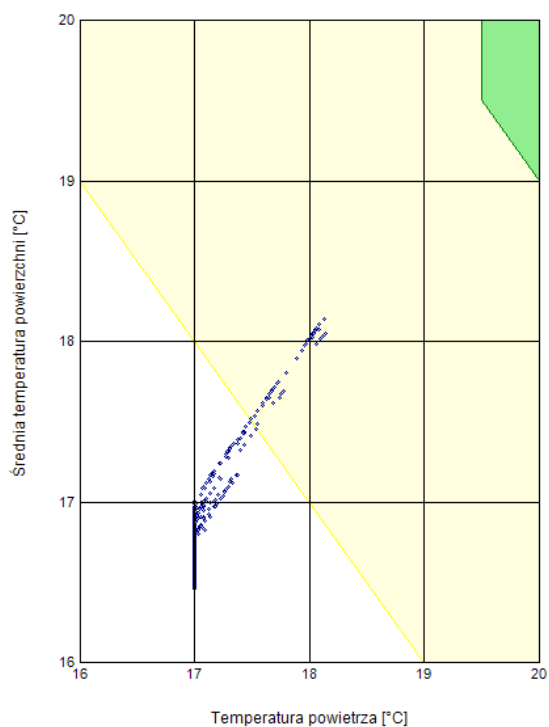
W *WUFI Plus* wykonano także analizy komfortu termicznego w budynku. Na podstawie wykonanych analiz stwierdzono niewielki pozytywny wpływ zielonej ściany na parametry komfortu. Różnice w przypadku wyliczonych wskaźników *PMV*, które przedstawia Wykres 28, są znikome i sięgają 0,03 (niektóre wartości nakładają się na siebie, dlatego różnice mogą być niewidoczne). Natomiast w kontekście odsetka osób niezadowolonych, z uwagi na zastosowanie roślin na przegrodach, jego wartość zmniejszyła się o około 0,5%, co sugeruje niewielki wzrost zadowolenia użytkowników z komfortu termicznego.



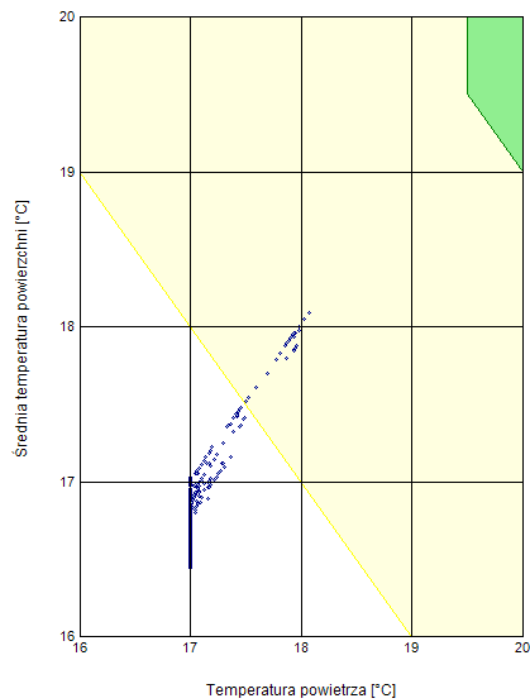
Wykres 28 Wyznaczone na podstawie symulacji wskaźniki *PMV* dla pomieszczenia ze ścianami zewnętrznymi z wypełnioną pustką powietrzną w budynku warstwą roślinności i bez roślinności na ścianach (opracowanie własne na podstawie obliczeń w *WUFI Plus*)

Jak wspomniano w poprzednich rozdziałach, na odczucia komfortu termicznego największy wpływ mają temperatura powietrza i średnia temperatura otaczających przegród. Wykonano analizę obu parametrów dla pomieszczeń z roślinnością na przegrodach i bez niej oraz z pustką powietrzną i wstrzykniętą w nią pianką poliuretanową, Wykres 29. Wyniki symulacji dla wszystkich przypadków wykazały, że warunki analizowanym pomieszczeniu mogą być określane jako bliskie komfortowym, co stanowi tylko część z wyników. Pozostałe punkty, znajdują się poza strefą określającą komfort termiczny w pomieszczeniu.

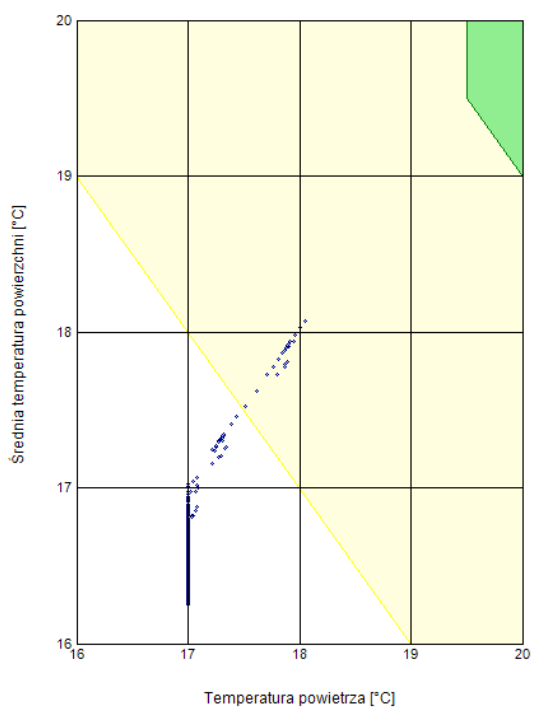
a)



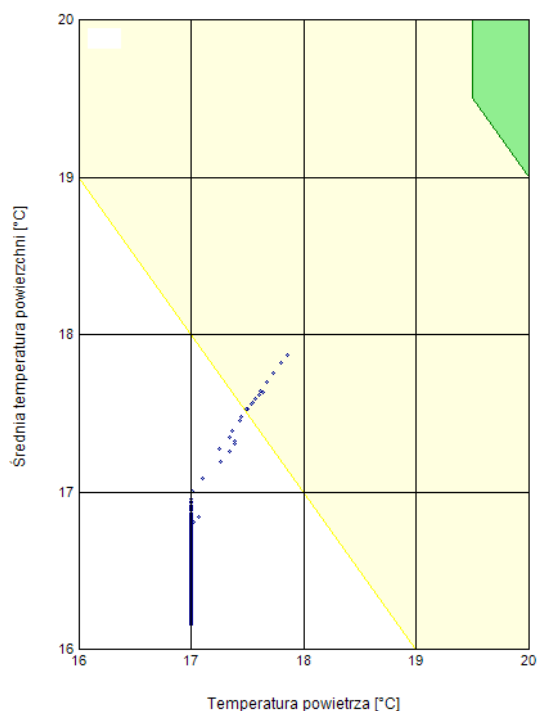
b)



c)



d)



Wykres 29 Zależność średniej temperatury powietrza i temperatury powierzchni przegród otaczających dla pomieszczenia a) z roślinnością i wypełnioną pustką powietrzną, b) bez roślinności z wypełnioną pustką powietrzną, c) z roślinnością i pustką powietrzną, d) bez roślinności i z pustką powietrzną, obszar zielony – strefa komfortu, obszar pomarańczowy – strefa bliska komfortu (opracowanie własne na podstawie obliczeń w *WUFI Plus*)

Na wykresie (Wykres 29) zauważalne są także różnice dotyczące panujących warunków komfortu termicznego wynikające z roślinności na ścianach zewnętrznych, zarówno w przypadku kiedy pustka powietrzna jest wypełniona pianą poliuretanową i kiedy nie jest. W okresie objętym symulacją tj. między 01.10.2021 a 14.01.2022 w analizowanych pomieszczeniach, dla ściany bez roślin tylko niewielka liczba punktów znajdujących się w obszarze charakteryzującym warunki w pomieszczeniu jako komfortowe jest mniejsza niż w przypadku, kiedy warstwa roślinności znajduje się na ścianie. Świadczy to o tym, że zieleń może być stosowana jako izolacja termiczna, ale także może pozytywnie wpływać, choć w niewielkim stopniu, na warunki w pomieszczeniach.

### **13. Wyznaczenie i analiza wskaźników komfortu cieplnego**

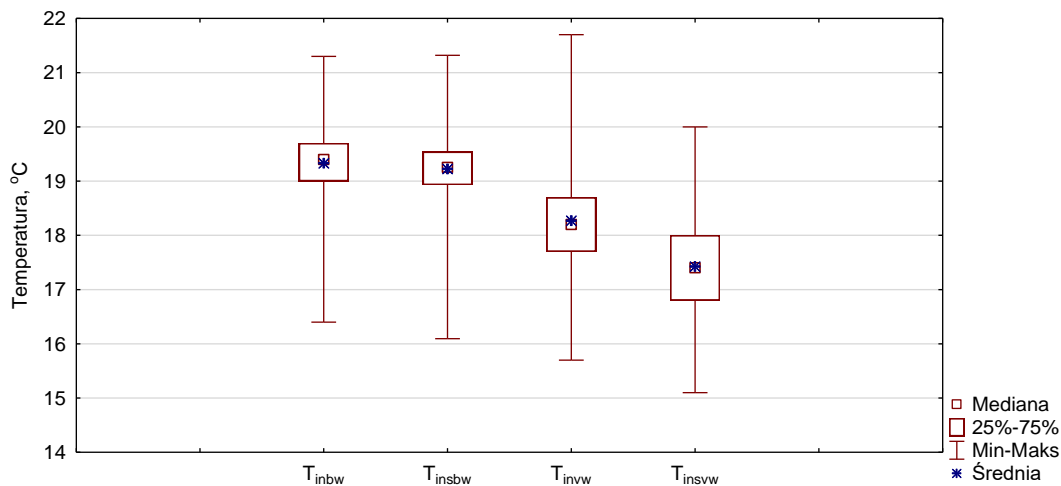
Zielone ściany wpływają na parametry w swoim otoczeniu m.in. temperaturę czy wilgotność względną powietrza. Jak wskazano w literaturze [122–125] roślinność porastająca ściany zewnętrzne ma pozytywny wpływ na komfort użytkowników w bliskim otoczeniu budynku oraz na warunki komfortu termicznego w pomieszczeniach. Wskaźniki komfortu w budynkach objętych niniejszym opracowaniem wyznaczono za pośrednictwem trzech metod: na podstawie bezpośrednich pomiarów kompleksowym urządzeniem do mikroklimatu, w sposób pośredni poprzez wykorzystanie zmierzonych parametrów w pomieszczeniu oraz za pomocą badań ankietowych. Powyższe działania wykonano na podstawie doświadczeń autorki zdobytych podczas uczestnictwa w projektach badawczych, których autorka wraz z zespołem badawczym zestawiała w literaturze [58,165,166].

#### **13.1. Mikroklimat w pomieszczeniu**

Na stanowiskach pomiarowych, zlokalizowanych w budynku z zieloną fasadą oraz w budynku bez roślinności na ścianach, wykonano pomiar parametrów powietrza wewnętrznego w całym okresie badawczym (08.2021-11.2022). Objęły one: temperaturę powierzchni przegrody zewnętrznej, temperaturę oraz wilgotność względną w pomieszczeniu. Rozkłady poszczególnych danych rejestrowanych w okresie pomiarów od 01.10.2021 r. do 14.01.2022 r. za pośrednictwem czujników oraz rejestratora ALMEMO przedstawiono na wykresach.

Wykres 30 przedstawia rozkład temperatur powietrza oraz temperatur powierzchni przegród zewnętrznych w pomieszczeniach budynków objętych niniejszym opracowaniem,

w których jedna z nich pokryta jest roślinnością a druga nie. Średnia temperatura powietrza w pomieszczeniu, gdzie zastosowano roślinność, wynosi 18,3°C, a granice górnego i dolnego kwartylu różnią się o 1°C, i wynoszą 17,7°C oraz 18,7°C.



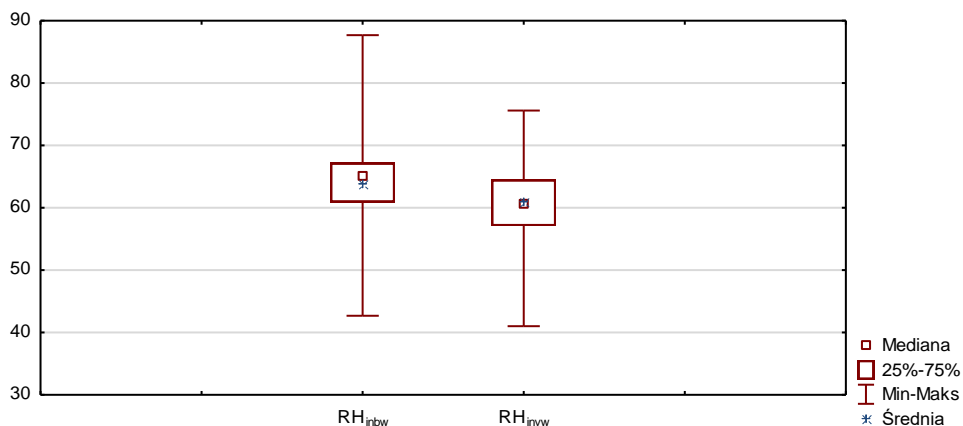
Wykres 30 Rozkład temperatur  $T_{inbw}$  - w pomieszczeniu bez warstwy roślinności na ścianach,  $T_{insbw}$  - powierzchni ściany zewnętrznej w budynku bez warstwy roślinności na ścianach,  $T_{invw}$  - w pomieszczeniu za warstwą roślinności,  $T_{insvw}$  - powierzchni ściany zewnętrznej w budynku za warstwą roślinności (opracowanie własne w programie Statistica)

Zarejestrowane niskie wartości, poniżej 17,7°C stanowiące mniej niż 25% uzyskanych danych, były chwilowym obniżeniem temperatury w pomieszczeniu i mogły być spowodowane przewietrzaniem pomieszczenia. Natomiast w przypadku mieszkania, bez roślinności na ścianach zewnętrznych różnice są mniejsze i wynoszą 0,7°C przy zakresie od 19,0°C do 19,7°C. Średnia temperatura powietrza w tym pomieszczeniu wyniosła 19,3°C. W przypadku temperatur wewnętrznych powierzchni ścian zewnętrznych w pomieszczeniach z roślinnością i bez także widoczne są różnice w granicach kwartyli, jak i środkowej wartości danych pomiarowych. Dla obiektu z roślinnością na przegrodach granice mieszczą się między 16,8°C a 18,0°C, przy jej braku to jedynie 0,6°C (między 18,9°C a 19,5°C). Różnice między średnimi temperaturami powietrza w pomieszczeniach oraz powierzchni wewnętrznych ich przegród wynoszą powyżej 1°C (1,0°C dla temperatury powietrza a 1,8°C dla temperatury powierzchni). Analizy wykazały, że w pomieszczeniach objętych badaniami utrzymywano inne parametry powietrza wewnętrznego. Różnica dotycząca średniej temperatury w pomieszczeniu mogła być spowodowana potrzebą utrzymywania wyższych temperatur w budynku bez roślinności na ścianach, z uwagi na preferencje cieplne mieszkańców.

Analizie poddano także rozkład wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniach budynków objętych badaniami (Wykres 31). Średnia wartość wilgotności w pomieszczeniu,



którego ściana zewnętrzna pokryta jest roślinnością, wyniosła 61%. Natomiast w pomieszczeniu bez niej była wyższa i określono ją na poziomie 64%.



Wykres 31 Rozkład wilgotności względnej  $RH_{inbw}$  - w pomieszczeniu bez warstwy roślinności na ścianach,  $RH_{inww}$  - w pomieszczeniu za warstwą roślinności (opracowanie własne w programie Statistica)

Cechą charakterystyczną dla powietrza w pomieszczeniu jest także zawartość wilgoci. Wyznaczono jego poziom na podstawie panującej temperatury powietrza w pomieszczeniu i wilgotności względnej. W obiekcie, w którym ściany zewnętrzne są pokryte roślinnością, zawartość wilgoci osiągnęła średnią wartość 8,0g/kg p.s., natomiast w pomieszczeniu bez zieleni na ścianach wyznaczono ją na poziomie 8,9g/kg p.s.. Wyższa zawartość wilgoci w powietrzu w budynku bez zielonej fasady może być spowodowana zróżnicowanym sposobem funkcjonowania rodziny, które związane może być m.in. z przygotowywaniem posiłków.

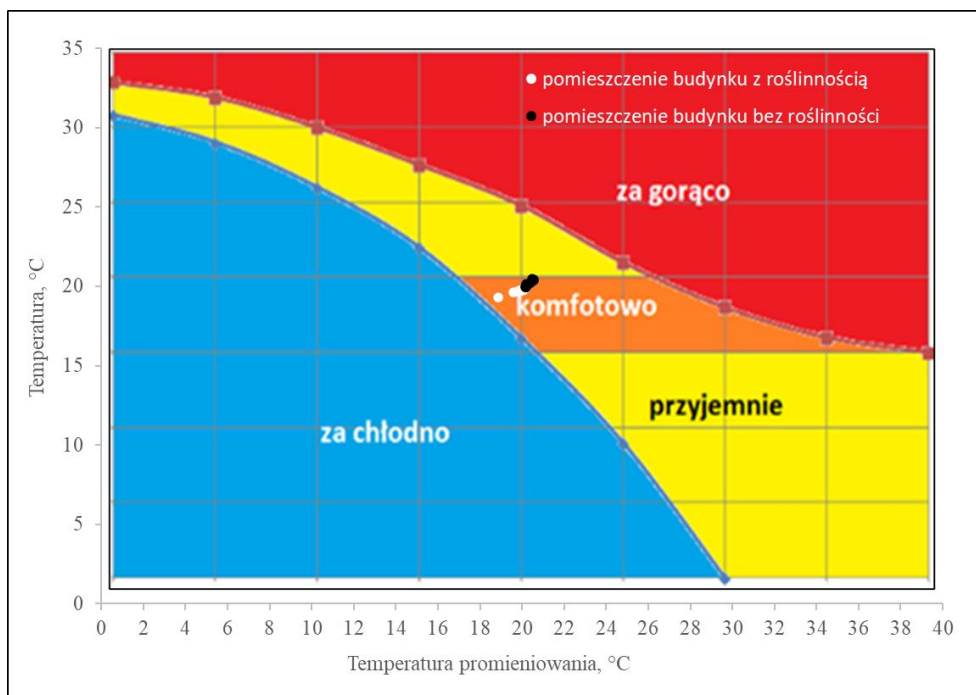
Badania objęły także pomiary krótkoterminowe parametrów mikroklimatu, które realizowano podczas wybranych wizyt w obiekcie w całym okresie badawczym. Objęły one dwie wizyty w obiekcie, gdzie roślinność na ścianie zewnętrznej nie została zastosowana oraz w budynku z zieloną ścianą. Zestawienie wyników poszczególnych parametrów przedstawiają Tabela 20 oraz Wykres 32. Na podstawie tabeli zauważyć można, że wartości mierzonych parametrów były wyższe w pomieszczeniu obiektu bez roślinności. Różnice średniej temperatury powietrza w badanych obiektach sięgały 0,4°C. Natomiast różnica średniej temperatury promieniowania przegród dla obu obiektów wyniosła 0,3°C. Prędkości powietrza zarejestrowane podczas realizacji pomiarów osiągały średnio niskie wartości 0,06m/s oraz 0,03m/s. Różnice widoczne są także dla stężeń dwutlenku węgla w pomieszczeniach. Zgodnie ze Standardem ASHRAE [167] górna zalecana granica stężenia CO<sub>2</sub> wynosi 1000ppm, a jego wartości nie powinny przekraczać 2500ppm [96]. W budynku z zieloną fasadą średnia wartość

wyniosła 1117ppm, co jest bliskie zaleceniom, natomiast w pomieszczeniu bez warstwy roślinności średnie stężenie było wyższe niż zalecane, lecz mieszące się w zakresie dopuszczalnym przez Standard [167].

Tabela 20 Parametry mikroklimatu w pomieszczeniach objętych badaniami zmierzone z wykorzystaniem kompleksowego urządzenia do pomiarów parametrów mikroklimatu (opracowanie własne)

Parametr (nazwa czujnika)	Budynek z zieloną fasadą			Budynek bez roślinności na ścianach		
	min	max	średnia	min	max	średnia
Temperatura powietrza, °C (czujnik FHAD 46)	19,3	19,9	19,8	20,0	20,5	20,2
Wilgotność względna powietrza, % (czujnik FHAD 46)	48	51	49	63	64	64
Temperatura promieniowania, °C (czujnik WBGT)	18,9	20,2	20,0	20,1	20,6	20,3
Prędkość powietrza, m/s (czujnik FVAD)	0,01	0,09	0,03	0,01	0,10	0,06
Ciśnienie, kPa (czujnik FHAD 46)	1010	1011	1011	1008	1008	1008
Stężenie CO <sub>2</sub> , ppm (czujnik FYAD)	1080	1204	1117	2289	2391	2358

Wykres 32 jest wykresem Köeniga, na który naniesiono wyznaczone na podstawie obliczeń parametrów mikroklimatu temperatury odczuwalne. Warunki w pomieszczeniu budynku z roślinnością na ścianach zawierają się w zakresie temperatur komfortowych. Także w przypadku budynku bez roślinności zależność między temperaturą powietrza a promieniowania określić można jako komfortowe.



Wykres 32 Zależność temperatury odczuwalnej od średniej temperatury powietrza i temperatury powierzchni przegród otaczających dla pomiarów krótkoterminowych przeprowadzonych w budynkach z roślinnością na ścianach i bez (opracowanie własne)

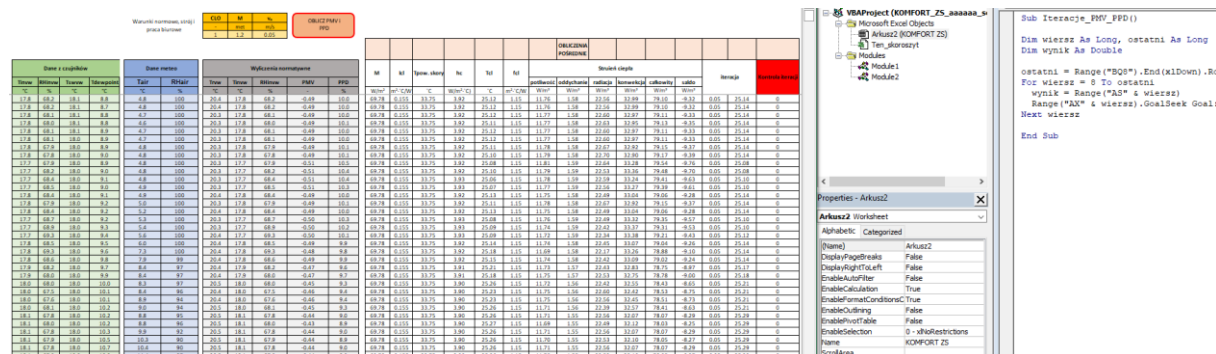
Parametry mikroklimatu ściśle związane są nie tylko z cieplnymi cechami konstrukcji budynku, ale również ze sposobem użytkowania ogrzewania, częstotliwością przewietrzania, preferencjami i funkcjonowaniem użytkowników, strukturą rodziny zamieszkującej badane obiekty itd.. Przykładowo, podczas badań, w których uczestniczyła autorka, wykazano m.in. zależności między dobowymi wahaniami temperatury powietrza w obiektach a typem zastosowanego w nich źródła ciepła [58]. Dlatego, należy podkreślić, że ocena komfortu każdorazowo jest niezwykle trudna i wymaga uwzględnienia oddziaływania wielu czynników, które mają wpływ na parametry powietrza w budynkach. Wymaga ona również odpowiedniej liczności próby, która w tym przypadku okazała się niewystarczająca do wykonania szczegółowej analizy na podstawie zarejestrowanych danych krótkoterminowych z uwagi na ograniczoną dostępność do badanych obiektów.

### 13.2. Analityczne wyznaczenie wskaźników komfortu cieplnego

Na podstawie zmierzonych oraz częściowo zamodelowanych parametrów powietrza wewnętrznego (rozdział 10 *Analiza zmierzonych i wyznaczonych parametrów*) oraz pozostałych charakterystycznych danych możliwe było wyznaczenie wielkości wybranych wskaźników komfortu cieplnego. Poziom komfortu termicznego w pomieszczeniach objętych niniejszym opracowaniem określono za pośrednictwem klasycznego podejścia P. O. Fanger

[84], w którym przeanalizowano związek między temperaturą, prędkością, wilgotnością względną powietrza w pomieszczeniach a temperaturą promieniowania przegród otaczających (zamodelowaną) oraz przyjętych danych normatywnych uwzględniających izolacyjność odzieży i aktywność fizyczną. Analizy przeprowadzono w oparciu o wskaźniki *PMV* i *PPD* oraz o normę *PN-EN ISO 7730:2006* [91].

Z uwagi na to, że wyznaczenie wskaźników przewidywanej średniej oceny oraz przewidywanego odsetka osób niezadowolonych opiera się na metodzie rekurencyjnej, co przedstawia równanie (2), na bazie kodu zawartego *PN-EN ISO 7730:2006* [91] stworzono makro w środowisku *Visual Basic* (wykorzystano je także podczas realizacji projektów badawczych, w których uczestniczyła autorka), fragment okna programu *Excel* przedstawia Rysunek 17. Obliczenia zrealizowano w dwóch grupach: wykorzystując długoterminowe obserwacje parametrów, częściowo zamodelowane wartości temperatury radiacyjnej oraz założenia dotyczące wartości izolacyjności cieplnej odzieży i tempa metabolizmu wyznaczone na podstawie normy *PN-EN ISO 7730:2006* [91], a także na podstawie zgromadzonych ankiet (wyniki zestawiono w rozdziale 13.3), jak i pomierzonych krótkoterminowych danych parametrów mikroklimatu.



Rysunek 17 Fragment okna programu *Excel* oraz makra w środowisku *Visual Basic* (opracowanie własne w programie Excel na podstawie [91])

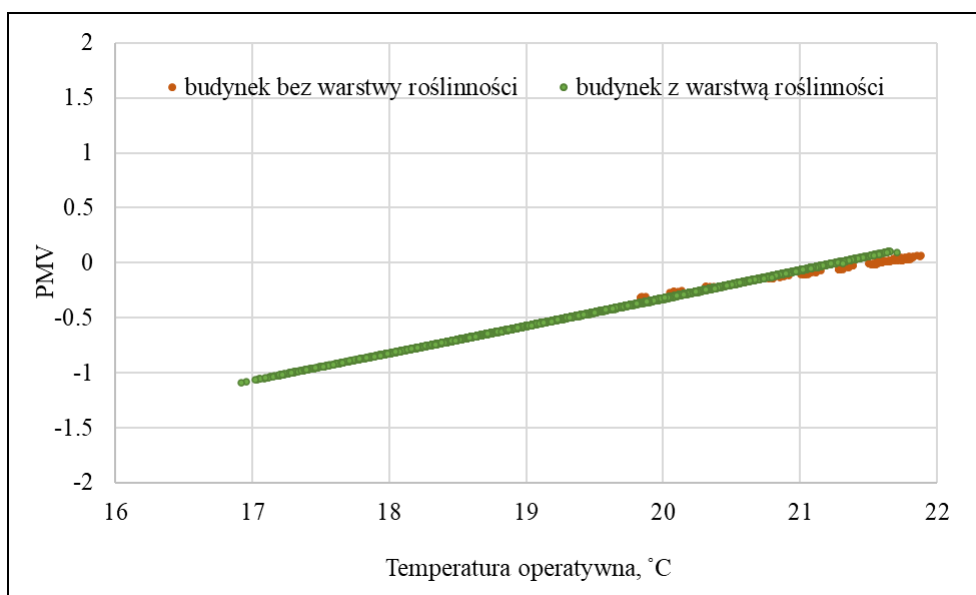
W normie *PN-EN 15251* [104] wyróżnione zostały cztery kategorie środowiska termicznego, do których zalicza się obiekty (Tabela 9), dla którego wyznaczane są wskaźniki komfortu termicznego. Obejmują one kryteria, które powinny być spełnione w celu zakwalifikowania wyniku obliczeń do akceptowalnego poziomu oczekiwań komfortu. Budynki objęte niniejszym opracowaniem zaliczono do III kategorii, czyli budynków istniejących o umiarkowanym poziomie oczekiwań, w której przewidywana średnia ocena mieści się w zakresie  $-0,7 < PMV < 0,7$ .

Do wyznaczenia wskaźników *PMV* oraz *PPD* komfortu termicznego z pomiarów długoterminowych niezbędne było zamodelowanie temperatury promieniowania (rozdział 10.3 *Temperatura promieniowania przegród*). Obliczenia dotyczące wskaźników komfortu cieplnego wykonano dla głównego pomieszczenia każdego z mieszkań (salon) i oparto na warunkach normatywnych, przyjęto izolacyjność cieplną odzieży 1clo oraz poziom aktywności równy 1,2met. Założono także stałą prędkość powietrza w pomieszczeniu na poziomie 0,05m/s. Kalkulacje wykonano także na podstawie temperatury i wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu.

Wyznaczono poziom komfortu termicznego w pokojach dziennych obiektów objętych badaniami. W przypadku budynku, gdzie roślinność na przegrodach nie została zastosowana zdecydowana większość pomiarów, około 99%, oceniona została jako warunki komfortowe (zakres  $-0,7 < PMV < 0,7$ ). Natomiast w przypadku drugiego z badanych obiektów w zakresie komfortu mieści się około 91% pomiarów. Obszar komfortu nie został osiągnięty w głównej mierze podczas godzin nocnych między godziną 21:00 a 5:00 (123 z 194 pomiarów). W pomieszczeniach obu analizowanych budynków przez większość czasu, w którym realizowano pomiary, warunki określono jako komfortowe. Z uwagi na zróżnicowane funkcjonowanie, wiek, a także preferencje cieplne mieszkańców nie jest możliwe bezpośrednie porównanie wyników związanych ze wskaźnikiem *PMV* obu budynków.

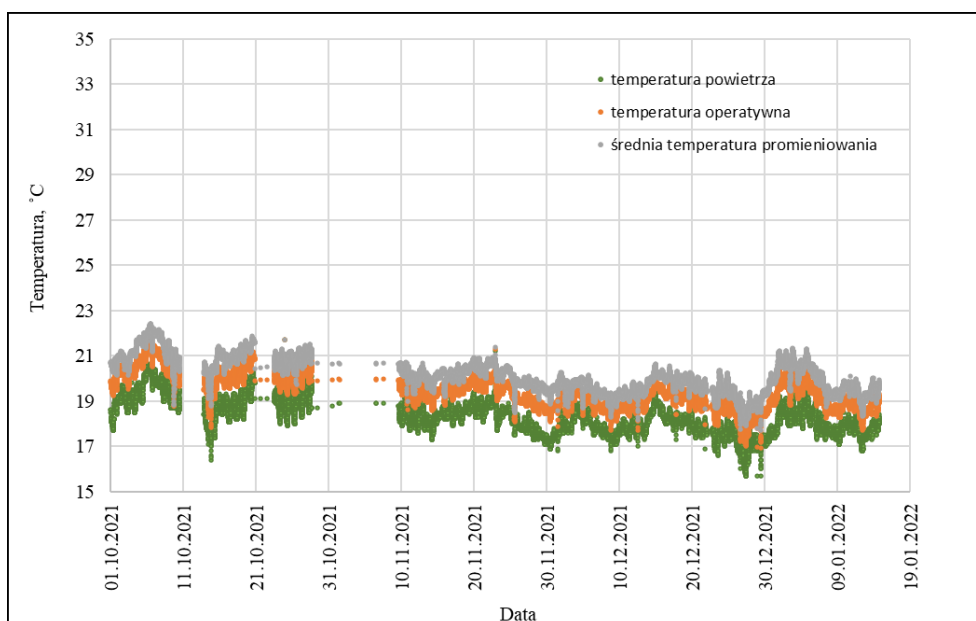
Jak wspomiano w rozdziale 6 *Komfort cieplny*, wyznacznikiem komfortu termicznego jest także temperatura operatywna. Opisuje ona niejednolite środowisko wewnętrzne, w którym człowiek wymienia taką samą ilość ciepła na drodze promieniowania i konwekcji. Do wykonania analiz komfortu temperaturę operatywną wyznaczono na podstawie wzoru (7) uwzględniającego współczynniki wymiany ciepła. Przyjęto współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję  $h_c=3,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  oraz wymiany ciepła przez promieniowanie  $h_r=4,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

Zmienność wyliczonego wskaźnika *PMV* w funkcji temperatury operatywnej przedstawia Wykres 33. Na jego podstawie stwierdzono liniową zależność między parametrami, zarówno dla budynku z roślinnością na przegrodach, jak i bez niej. Dla temperatury operatywnej na poziomie 17°C wskaźnik komfortu przyjmuje średnią wartość na poziomie -0,8 dla obu analizowanych pomieszczeń. Natomiast przy wyższych wartościach temperatury operatywnej widoczne jest obniżenie wskaźnika *PMV* o około 0,1 dla budynku bez roślinności na przegrodach. Jest to niewielka różnica, lecz może ona świadczyć o szybszym uzyskiwaniu warunków komfortu dla przegród z zastosowaniem zielonych fasad, jednocześnie wpływ na to może mieć izolacyjność cieplna przegrody. W celu uzyskania bardziej precyzyjnych wniosków niezbędne są dodatkowe badania, co może zostać poruszone w kolejnych opracowaniach.



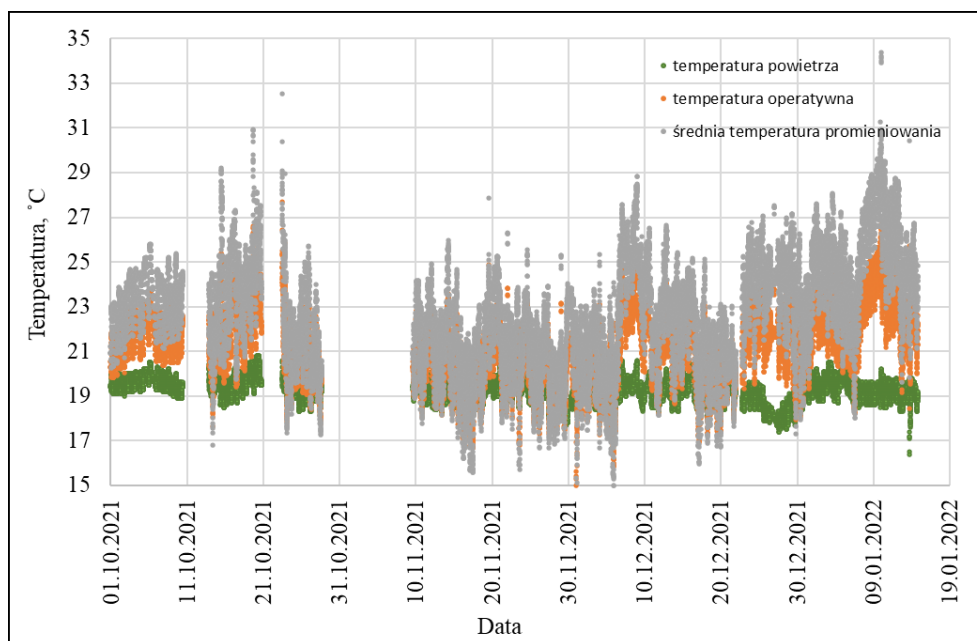
Wykres 33 Wskaźnik *PMV* w funkcji temperatury operatywnej (opracowanie własne)

Zależność między temperaturami tj. temperaturą powietrza, wyznaczoną temperaturą operatywną oraz średnią zamodelowaną temperaturą promieniowania także jest istotna z punktu utrzymania warunków komfortu. W przypadku pomieszczenia bez roślinności na ścianach (Wykres 35) średnia temperatura charakteryzująca otaczające przegrody ściśle związana jest z wyliczoną temperaturą operatywną (korelacja blisko 1), nieco mniej z temperaturą powietrza (korelacja 0,4).



Wykres 34 Zmienność temperatury powietrza, operatywnej oraz średniej temperatury promieniowania w okresie pomiarowym dla budynku z warstwą roślinności na ścianach (opracowanie własne)

Natomiast analizując pomieszczenie z zieloną fasadą na jego ścianie zewnętrznej (Wykres 34) korelacje między temperaturą promieniowania a operatywną i powietrza są wyższe, wynoszą kolejno 0,98 oraz 0,92. Na tej podstawie wskazać można, że warunki komfortu są bardziej stabilne w przypadku obiektu z izolacją roślinną oraz cieplną na oraz w przegrodzie zewnętrznej.



Wykres 35 Zmienność temperatury powietrza, operatywnej oraz średniej temperatury promieniowania w okresie pomiarowym dla budynku bez roślinności na ścianach (opracowanie własne)

Z uwagi na zbyt małą ilość zgromadzonych danych krótkoterminowych w okresie badań, nie było możliwe porównanie ich wyników z danymi długoterminowymi.

### 13.3. Badania ankietowe

W celu uzyskania subiektywnej oceny środowiska wewnętrznego przeprowadzono badania ankietowe wśród użytkowników. Przygotowano formularze oddzielnie dla kobiet i mężczyzn w formie elektronicznej za pośrednictwem narzędzia on-line *Questionpro*, dzięki temu nie było konieczności digitalizowania, a respondenci mogli wypełniać je w dowolnym czasie. Pytania do badań ułożono na podstawie zdobytej przez autorkę wiedzy podczas projektów badawczych oraz wykonanych tam formularzy. Indywidualne linki do ankiet zostały udostępnione respondentom. Podczas jednej z pierwszych wizyt udzielono instruktażu do ich dostępu oraz wypełniania. W instrukcji uwzględniono wypełnianie ankiety po czasie adaptacji do

panujących warunków (minimum 30 minut od wejścia do pomieszczenia) oraz minimum 30 min po przyjęciu posiłku.

### Projekt ankiety

Formularz opracowano na podstawie 17 pól uwzględniających m.in. informacje dotyczące daty i godziny wypełnienia kwestionariusza, skali odczuć oraz preferencji cieplnych, a także realizowanych działań mających wpływ na utrzymanie komfortu cieplnego w pomieszczeniu. Respondenci mieli dostęp do ankiet poprzez narzędzie *Questionpro* przez cały okres wykonywania badań. Fragment kwestionariusza przedstawia Rysunek 18.

1. W tej chwili jest mi:

zimno    chłodno    lekko chłodno    neutralnie (ani za ciepło, ani za zimno)    lekko ciepło    ciepło    gorąco

2. Chciałbym, żeby mi było teraz:

zdecydowanie chłodniej    chłodniej    lekko chłodniej    bez zmian    lekko cieplej    cieplej    zdecydowanie cieplej

7. Jak bardzo jesteś zadowolony w tej chwili ze środowiska wewnętrznego w Twoim miejscu zamieszkania?

☹️    😞    😐    😊    😄

Rysunek 18 Podgląd ankiety wykonanej w formie on-line (opracowanie własne w questionpro.com)

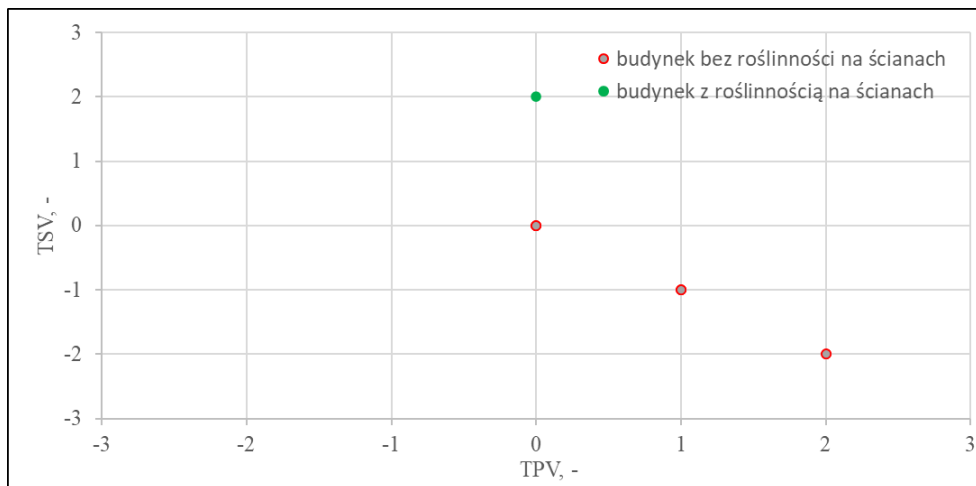
Formularz zaprojektowano tak, żeby nie sugerować respondentom odpowiedzi. Ponadto, dla ułatwienia wypełniania ankiety zastosowano różne kolory prezentowanych odpowiedzi. Kwestionariusz wykonano w oparciu o pytania zamknięte i otwarte, a także przygotowano przyciski oraz listy wyboru i suwaki. W niniejszym opracowano oraz przeanalizowano odpowiedzi dotyczące oceny i preferencji cieplnych respondentów.

### Rzeczywiste odczucia i preferencje cieplne respondentów

W badaniach uczestniczyła grupa mieszkańców, zarówno kobiet, jak i mężczyzn, w różnym wieku. Respondenci mieli pełną dowolność uwzględniającą czas wypełnienia kwestionariuszy. Podczas całego okresu badań zebrano 15 ankiet, z uwagi na ich niewielką liczbę do dalszych analiz uwzględniono także te, których oceny nie obejmują okresu badań. Na



ich podstawie wyznaczono wskaźniki *TSV* (Thermal Sensation Vote), oraz *TPV* (Thermal Preference Vote), co przedstawia Wykres 36 oraz wykonano analizy subiektywne komfortu termicznego w pomieszczeniach.



Wykres 36 Poziom odczuć i preferencje cieplne deklarowane przez użytkowników badanych lokali w ramach ankietyzacji (opracowanie własne)

Według respondentów (Wykres 36), którzy wypełnili kwestionariusze w ramach ankietyzacji w obiekcie bez roślinności pokrywającej ściany zewnętrzne, poziom odczuć cieplnych mieści się w zakresie  $\langle -2;0 \rangle$  (w mieszkaniu zainstalowana jest klimatyzacja, jednak według uzyskanych informacji podczas wypełniania ankiet nie była ona uruchomiona). Na podstawie 13 ankiet respondenci wskazali, że warunki panujące w obiekcie są dla nich neutralne (38,5% odpowiedzi), jest lekko chłodno (38,5% odpowiedzi) i jest chłodno (23%). Analogicznie, w odniesieniu do poziomu odczuć cieplnych mieszkańcy określili swoje preferencje cieplne i chcieliby, żeby warunki zostały takie, jak panują obecnie w pomieszczeniu (dla  $TSV=0$ ), było trochę cieplej ( $TSV=-1$ ) oraz było cieplej ( $TSV=-2$ ). Izolacyjność cieplna odzieży podczas wypełniania ankiet określono w zakresie  $0,21\text{clo} \div 0,71\text{clo}$ . Natomiast w budynku z roślinnością na podstawie dwóch ankiet respondenci wskazali, że jest im lekko ciepło (50% odpowiedzi oraz izolacyjność odzieży równa  $0,55\text{clo}$ ) oraz ciepło (50% odpowiedzi oraz izolacyjność odzieży na poziomie  $0,13\text{clo}$ ).

Z uwagi na odmienne warunki uwzględniające izolacyjność przegród zewnętrznych oraz zbyt małą liczbę wypełnionych kwestionariuszy nie było możliwe dokonanie bezpośredniego porównania otrzymanych wyników, oraz zestawienie ich ze zmierzonymi parametrami mikroklimatu w obiektach z roślinnością na ścianach i bez niej.

## 14. Podsumowanie i wnioski końcowe

W obszarach miejskich, gdzie tkanka zabudowań jest gęsta, poszukuje się rozwiązań, które zwiększą komfort i jakość życia mieszkańców. Ograniczenia wynikające z określonych granic działek, a także z uwagi na objęcie budynków ochroną konserwatorską wpływają na to, że docieplenie ścian zewnętrznych budynków za pośrednictwem tradycyjnych metod jest utrudnione, a czasem niemożliwe. Natomiast izolowanie przegród od strony wewnętrznej niesie ze sobą zmniejszenie powierzchni użytkowej i generalny remont obiektu. Dlatego poszukuje się rozwiązań niekonwencjonalnych dążących do obniżenia energochłonności budynków, lecz w jak najmniejszym stopniu ingerujących w konstrukcję budynku. Jednym z takich rozwiązań jest zastosowanie zielonej ściany.

Przegląd literaturowy [3–9] wskazał, że roślinność na przegrodach może pozytywnie wpłynąć na współczynnik przenikania ciepła, a co za tym idzie ograniczyć zużycie energii w budynku. Badania doświadczalne przeprowadzone na istniejącym obiekcie wykazały osiąganie wyższych wartości temperatury przegrody od panującej w warstwie roślinnej średnio o  $0,7^{\circ}\text{C}$  w badanym okresie, co może skutkować ograniczeniem zużycia energii potrzebnej na ogrzewanie.

W celu określenia stopnia obniżenia energochłonności budynku wykonano symulacje w programie *WUFI Plus*. W przypadku zielonej ściany z roślinnością zimozieloną na budynku nie posiadającym izolacji na ścianach zewnętrznych możliwa jest redukcja zapotrzebowania na energię o około 12% dla budynku zlokalizowanego w klimacie Polski w okresie zimnym obejmującym miesiące październik-styczeń (105dni). Należy jednak mieć na uwadze, że rodzaj wykonanej zielonej ściany oraz grubości poszczególnych jej warstw, zastosowana w przegrodzie lub na jej powierzchni izolacja termiczna, a także lokalizacja budynku (warunki klimatu zewnętrznego) mają wpływ na powyższy wynik.

Na podstawie przeprowadzonych analiz można przypuszczać, że roślinność posiada większy potencjał energetyczny w okresie letnim. Związane jest to z brakiem ograniczeń związanych z rodzajem stosowanej roślinności wynikających z gubienia liści niektórych z nich w miesiącach zimowych, a także wyższą energochłonnością procesów chłodniczych niż grzewczych. Literatura [128] wskazuje, że podczas ciepłych warunków pogodowych, kiedy temperatura panująca wewnątrz budynku jest niższa od warunków zewnętrznych, roślinność stosowana na ścianach w większym stopniu wpływać może na ograniczenie zużywanej energii na cel utrzymania komfortowych warunków w budynku. Tematyka uwzględniająca transport

ciepła przez zieloną ścianę w okresie letnim w warunkach klimatu Polski może zostać poruszona w kolejnych opracowaniach.

Na podstawie przeprowadzanych badań wykazano wpływ zaimplementowanej roślinności na transport ciepła przez przegrodę dla budynku zlokalizowanego we Wrocławiu. Wskazano, że gęstość strumienia ciepła docierającego do zewnętrznej powierzchni ściany zewnętrznej budynku w okresie zimnym przy zastosowaniu roślinności jest średnio  $37,6\text{W/m}^2$  wyższa niż w przypadku braku warstwy roślinnej. Wynika to z akumulacji ciepła w warstwie zieleni, co pozwala na utrzymanie wyższych temperatur w obszarze ścian oraz ogranicza straty ciepła z budynku. Zaprezentowano niedopasowanie istniejącego opisanego w literaturze modelu I. Susorovej i in. [13] do zgromadzonych obserwacji i zmodyfikowano go pod kątem zastosowania na obiekcie objętym badaniami doświadczalnymi. Wykazano prawdziwość założonej w pracy tezy i ukazano, że możliwe jest zmodyfikowanie istniejącego modelu opisującego proces wymiany ciepła przez przegrodę z zieloną fasadą dla ściany zlokalizowanej w klimacie umiarkowanym ciepłym typu przejściowego dla okresu zimnego. Dopasowanie modelu zrealizowano na poziomie błędu wynoszącego średnio 10% wartości zmierzonej. Natomiast w celu zastosowania go do warunków innych niż w niniejszej pracy, z uwagi na zastosowane w nim dane empiryczne, konieczne jest jego zweryfikowanie.

Stosowanie zielonych ścian i dachów na budynkach wpisuje się w myśl polityki wielu miast [67–70] i krajów, które kierują się ideą zrównoważonego rozwoju oraz dążą do redukcji miejskich wysp ciepła, a co za tym idzie także do zwiększenia komfortu jego mieszkańców. Zielone ściany zwiększają powierzchnię biologicznie czynną w obszarach miejskich, a ich potencjał zastosowania, z uwagi na warunki wykonania, jest większy niż zielonych dachów. Dlatego roślinność stosowana na przegrodach pionowych może mieć istotny wpływ na łagodzenie efektów miejskiej wyspy ciepła, poprawę mikroklimatu miejskiego oraz jakości życia mieszkańców miast [157].

Literatura [121–126] wskazuje, że zielone ściany na budynkach mogą pozytywnie wpływać na odczucia cieplne mieszkańców w kontekście globalnym miasta, jak i lokalnym dla mieszkańców budynku, na którym roślinność została zaimplementowana. Na podstawie badań doświadczalnych oraz przeprowadzonej ankietyzacji wśród mieszkańców wyznaczono wybrane wskaźniki komfortu termicznego (*PMV*, *PPD*, *TSV*, *TPV*, temperaturę operatywną). Z uwagi na niejednolite warunki związane innym trybem funkcjonowania mieszkańców, a także w związku z zastosowaną izolacją cieplną w ścianie zewnętrznej oraz zbyt małą liczbą danych krótkoterminowych dotyczących parametrów mikroklimatu, nie było możliwe jednoznaczne określenie wpływu roślinności na wybrane wskaźniki komfortu cieplnego

w budynkach objętych analizami. Wskazuje na to złożoność zagadnienia związanego z oceną komfortu termicznego w obiektach istniejących. Natomiast przeprowadzone symulacje komputerowe w programie *WUFI Plus* ukazały, że roślinność zastosowana na ścianach zewnętrznych ma niewielki korzystny wpływ na warunki komfortu cieplnego, w szczególności na średnią temperaturę przegród.

Przeprowadzone badania doprowadziły do sformułowania następujących wniosków końcowych:

1. Możliwe jest opisanie transportu ciepła przez ścianę zewnętrzną z roślinnością dla okresu zimnego za pośrednictwem równań matematycznych i parametrów empirycznych. Wykonany w niniejszym opracowaniu model nie jest modelem uniwersalnym, należy go weryfikować oraz ewentualnie modyfikować w zależności od rodzaju zastosowanej roślinności i klimatu zewnętrznego.
2. Opracowany model opisuje zjawisko transportu ciepła przez przegrodę z roślinnością, zieloną fasadą w klimacie umiarkowanym ciepłym typu przejściowego w okresie zimnym przy zmieniającym się wskaźniku ulistnienia *LAI*.
3. Zastosowana warstwa roślinności na ścianie zewnętrznej budynku okresowo gubiącej liście w okresie zimnym podnosi temperaturę w obszarze przegrody, co wpływa na gęstość strumienia ciepła, a co za tym idzie ogranicza straty z budynku.
4. Zielone ściany ograniczają zużycie energii przeznaczonej na ogrzewanie w okresie zimowym nawet o 12%. Przypuszcza się, że w okresie letnim redukcja energii zużywanej na cele chłodzenia może być jeszcze większa niż w miesiącach chłodnych. Związane jest to m.in. z brakiem ograniczeń spowodowanych brakiem ulistnienia wśród niektórych gatunków roślin.
5. Zielone ściany, a w szczególności zielone fasady są alternatywą izolacji ścian zewnętrznych w budynkach pozostających pod ochroną konserwatorską, które nie mogą być ocieplane w sposób tradycyjny.
6. Zielone fasady posiadają większy niż zielone dachy potencjał do stosowania w obszarach o gęstej tkance miejskiej oraz istniejącej zabudowie, z uwagi na mniejsze ograniczenia związane z warunkami ich wykonywania oraz większą powierzchnię dyspozycyjną.
7. Zastosowanie zielonych ścian pozytywnie wpływa na jakość życia mieszkańców miast. Rośliny poprzez wykorzystywane do życia procesy m.in. ewapotranspirację zmieniają parametry mikroklimatu np. temperaturę i wilgotność względną powietrza. Warstwa

roślinna na ścianach niejednokrotnie poprawia aspekt wizualny budynku, jak i korzystanie wpływa na samopoczucie osób znajdujących się w pobliżu.

8. Badania długookresowe realizowane na obiektach rzeczywistych we współpracy z mieszkańcami są swego rodzaju wyzwaniem, w szczególności, jeśli są to badania dobrowolne, a uczestnicy nie są wynagradzani za udział w projekcie.

Powyższe wnioski oraz coraz bogatsze działania władz samorządowych oraz na szczeblu międzynarodowym wskazują na to, że zielone ściany na obszarach miast będą miały coraz większe zastosowanie.

Przedstawione w niniejszej pracy badania oraz wnioski wskazują na bardzo duże możliwości wykorzystania roślin na ścianach, w szczególności na ścianach zewnętrznych, także w budynkach istniejących. Na podstawie wykonanych prac widoczny jest duży potencjał badania obszaru uwzględniającego roślinność w oraz na budynkach, oraz korzyści i ograniczeń płynących z jej zastosowania. Dotyczą one m.in. określenia wpływu roślinności na całoroczne obniżenie energochłonności dla budynku przy zastosowaniu różnych typów roślin, wyznaczenia zależności między wskaźnikiem ulistnienia a współczynnikiem tłumienia, co autorka ma zamiar kontynuować w dalszej pracy badawczej.

## 15. Bibliografia

- [1] EU Buildings Factsheets | Energy, (n.d.). [https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-factsheets\\_en](https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-factsheets_en) (dostęp: styczeń 24, 2022).
- [2] Komisja Europejska, Fala renowacji na potrzeby Europy –ekologizacja budynków, tworzenie miejsc pracy, poprawa jakości życia, (2020) 33.
- [3] J. Janiak, Zieleń na elewacjach – problem czy korzyść dla budynku?, ACTA SCIENTIARUM POLONORUM - Architectura Budownictwo. 18 (2019) 119–132.
- [4] M. Ottel , K. Perini, A.L.A. Fraaij, E.M. Haas, R. Raiteri, Comparative life cycle analysis for green facades and living wall systems, Energy Build. 43 (2011) 3419–3429.
- [5] Zinowiec-Cieplik Kinga, Potencjał integracji form roślinnych z architekturą - środowisko i technika, Kwartalnik Naukowy Uczelni Vistula. 4 (2017) 128–141.
- [6] K. Perini, M. Ottel , E.M. Haas, R. Raiteri, Vertical greening systems, a process tree for green facades and living walls, Urban Ecosyst. 16 (2013) 265–277.
- [7] I. Wong, A.N. Baldwin, Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise residential buildings for energy-saving in sub-tropical region, Build Environ. 97 (2016) 34–39.
- [8] L. Pan, L.M. Chu, Energy saving potential and life cycle environmental impacts of a vertical greenery system in Hong Kong: A case study, Build Environ. 96 (2016) 293–300.
- [9] D. Fabianowski, Wpływ zieleni na energooszczędność budynku, Zieleń Miejska. (2011) 46–49.
- [10] M. Liao Zaiyi, J.L. Niu, Study on thermal function of ivy-covered walls, in: Build Simul, 1998.
- [11] M. Bruse, H. Fleer, Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, 1998. <http://www.geographie.ruhr->
- [12] A. Hui, S.C. M Hui, M. ZHAO Zheng, Kowloon Shangri-la Hotel, Tue, (2013).
- [13] I. Susorova, M. Angulo, P. Bahrami, Brent Stephens, A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance, Build Environ. 67 (2013) 1–13.
- [14] M. Scarpa, U. Mazzali, F. Peron, Modeling the energy performance of living walls: Validation against field measurements in temperate climate, Energy Build. 79 (2014) 155–163.

- [15] L. Malys, M. Musy, C. Inard, A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption, *Build Environ.* 73 (2014) 187–197.
- [16] H. Li, Y. Zhao, B. Sützl, A. Kubilay, J. Carmeliet, Impact of green walls on ventilation and heat removal from street canyons: Coupling of thermal and aerodynamic resistance, *Build Environ.* 214 (2022).
- [17] A. Hoyano, Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building, *Energy Build.* 11 (1988) 181–199.
- [18] F. Wilmers, Effects of Vegetation on Urban Climate and Buildings, *Energy Build.* 91 (1990) 507–514.
- [19] J.Q. Zhang, X.P. Fang, H.X. Zhang, W. Yang, C.C. Zhu, A heat balance model for partially vegetated surfaces, 1997.
- [20] H.F. Di, D. Wang, Cooling effect of ivy on a wall, *Experimental Heat Transfer.* 12 (1999) 235–245.
- [21] G. Kidawska, Wpływ miejskiej wyspy ciepła na rozmieszczenie stanowisk powojnika pnącego (*Clematis vitalba* L.) we Wrocławiu.
- [22] W.J. Stec, A.H.C. Van Paassen, A. Maziarz, Modelling the double skin façade with plants, *Energy Build.* 37 (2005) 419–427.
- [23] The Potential of Vegetation in Reducing Summer Cooling Loads in Residential Buildings.
- [24] N.H. Wong, A.Y.K. Tan, P.Y. Tan, N.C. Wong, Energy simulation of vertical greenery systems, *Energy Build.* 41 (2009) 1401–1408.
- [25] S. Flores Larsen, C. Filippín, G. Lesino, Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software, *Solar Energy.* 121 (2015) 56–67.
- [26] Scopus - Document search,  
<https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic> (dostęp: styczeń 19, 2023).
- [27] A. Muciek, Wyznaczanie modeli matematycznych z danych eksperymentalnych, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.* (2012) 1–279.
- [28] A. Medl, R. Stangl, F. Florineth, Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement, *Build Environ.* 125 (2017) 227–239.
- [29] M. Weinmaster, Are green walls as “green” as they look? An introduction to the various technologies and ecological benefits of green walls, *Journal of Green Building.* 4 (2009).

- [30] E. Cuce, Thermal regulation impact of green walls: An experimental and numerical investigation, *Appl Energy*. 194 (2017) 247–254.
- [31] E. Trzaskowska, Wykorzystanie roślin w projektowaniu architektonicznym (pnącza, ogrody wertykalne), *Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych*. (2010) 110–121.
- [32] K. Perini, P. Rosasco, Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems, *Build Environ*. 70 (2013) 110–121.
- [33] Kania Andrzej, Mioduszevska Magdalena, Płonka Patrycja, Rabiński Jarema A., Skarżyński Daniel, Walter Ewa, Weber-Siwirska Marta, *Zasady projektowania i wykonywania zielonych dachów i żyjących ścian. Poradnik dla gmin*, Kraków, 2013.
- [34] A.B. Besir, E. Cuce, Green roofs and facades: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82 (2018) 915–939.
- [35] T. Malec, Ogrody wertykalne w przestrzeni polskich miast, *Architektura*. 6-A (2012) 299–305.
- [36] Best Green Walls in the World. <https://matadornetwork.com/read/green-walls-world/> (dostęp: kwiecień 28, 2022).
- [37] T. Sternberg, H. Viles, A. Cathersides, M. Edwards, Dust particulate absorption by ivy (*Hedera helix* L) on historic walls in urban environments, *Science of the Total Environment*. 409 (2010) 162–168.
- [38] K. V. Horoshenkov, A. Khan, H. Benkreira, Y. Smyrnova, K. Rehioui, J. Kang, Acoustic properties of low growing plants, in: 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2013, INTER-NOISE 2013: Noise Control for Quality of Life, OAL-Osterreichischer Arbeitsring fur Larmbekampfung (2013). 3912–3917.
- [39] G. Pérez, J. Coma, C. Barreneche, A. De Gracia, M. Urrestarazu, S. Burés, L.F. Cabeza, Acoustic insulation capacity of Vertical Greenery Systems for buildings, *Applied Acoustics*. 110 (2016) 218–226.
- [40] A.M. Lacasta, A. Penaranda, I.R. Cantalapiedra, C. Auguet, S. Bures, M. Urrestarazu, Acoustic evaluation of modular greenery noise barriers, *Urban For Urban Green*. 20 (2016) 172–179.
- [41] Z. Azkorra, G. Pérez, J. Coma, L.F. Cabeza, S. Bures, J.E. Álvaro, A. Erkoreka, M. Urrestarazu, Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings, *Applied Acoustics*. 89 (2015) 46–56.



- [42] B. Bass, Green Roofs and Green Walls: Potential Energy Savings in the Winter. Report, 2007. <https://www.researchgate.net/publication/242663071>. (dostęp: marzec 9, 2022).
- [43] Y. He, H. Yu, A. Ozaki, N. Dong, S. Zheng, An investigation on the thermal and energy performance of living wall system in Shanghai area, *Energy Build.* 140 (2017) 324–335.
- [44] F. Ascione, R.F. De Masi, M. Mastellone, S. Ruggiero, G.P. Vanoli, Green walls, a critical review: Knowledge gaps, design parameters, thermal performances and multi-criteria design approaches, *Energies (Basel)*. 13 (2020).
- [45] K. Perini, M. Ottel , A.L.A. Fraaij, E.M. Haas, R. Raiteri, Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope, *Build Environ.* 46 (2011) 2287–2294.
- [46] J. Coma, G. P rez, A. de Gracia, S. Bur s, M. Urrestarazu, L.F. Cabeza, Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades, *Build Environ.* 111 (2017) 228–237.
- [47] K. V. Abhijith, P. Kumar, J. Gallagher, A. McNabola, R. Baldauf, F. Pilla, B. Broderick, S. Di Sabatino, B. Pulvirenti, Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review, *Atmos Environ.* 162 (2017) 71–86.
- [48] T.A.M. Pugh, A.R. MacKenzie, J.D. Whyatt, C.N. Hewitt, Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons, *Environ Sci Technol.* 46 (2012) 7692–7699.
- [49] J. Mori, F. Ferrini, A. Saebo, Air pollution mitigation by urban greening, *Italus Hortus.* 25 (2018) 13–22.
- [50] F. Torpy, M. Zavattaro, P. Irga, Green wall technology for the phytoremediation of indoor air: a system for the reduction of high CO<sub>2</sub> concentrations, *Air Quality, Atmosphere & Health* 2016 10:5. 10 (2016) 575–585.
- [51] T.E. Morakinyo, Y.F. Lam, S. Hao, Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: Modelling and measurement, *J Environ Manage.* 182 (2016) 595–605.
- [52] B.A. Currie, B. Bass, Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model, *Urban Ecosyst.* 11 (2008) 409–422.
- [53] K. Perini, M. Ottel , E.M. Haas, R. Raiteri, Greening the building envelope, facade greening and living wall systems, *Open J Ecol.* 01 (2011) 1–8.

- [54] SemperGreenwall – zielona ściana, (n.d.).  
<https://www.sempergreen.com/pl/rozwiazania/zielone-sciany> (dostęp: styczeń 23, 2022).
- [55] S. Sheweka, N. Magdy, The living walls as an approach for a healthy urban environment, *Energy Procedia*, Elsevier, (2011) 592–599.
- [56] M.A. Sayegh, J. Danielewicz, T. Nannou, M. Miniewicz, P. Jadwiszczak, K. Piekarska, H. Jouhara, Trends of European research and development in district heating technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 68 (2017) 1183–1192.
- [57] Ministerstwo Aktywów Państwowych, Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030. Założenia i cele oraz polityki i działania. 4.1 (2019).
- [58] M. Baborska-Narożny, E. Stefanowicz, K. Piechurski, N. Fidorów-Kaprawy, M. Laska, M. Mokrzecka, M. Małyszko, A. Chmielewska, M. Smektała, M. Troszyński, L. Maury, Węglem i nie węglem. Ogrzewanie kamienic: perspektywa mieszkańców i scenariusze zmian. Rzeczywiste koszty, komfort termiczny i warunki korzystania z różnych systemów ogrzewania, *Węglem i Nie Węglem. Ogrzewanie Kamienic: Perspektywa Mieszkańców i Scenariusze Zmian. Rzeczywiste Koszty, Komfort Termiczny i Warunki Korzystania z Różnych Systemów Ogrzewania*. (2020).
- [59] Ł. Adamkiewicz, Zewnętrzne koszty zdrowotne emisji zanieczyszczeń powietrza z sektora bytowo-komunalnego. Szacunki na podstawie dostępnych danych, *Ministerstwo Przedsiębiorczości i Technologii*. 456, 453, 603.
- [60] KOBiZE, Krajowy bilans emisji pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 2015-2017 w układzie klasyfikacji SNAP. Raport syntetyczny.
- [61] Eurostat, Statystyki dotyczące energii, (n.d.).  
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/main-tables>. (dostęp: luty 03, 2022).
- [62] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/ z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej.
- [63] K. Ratajczak, Ł. Amanowicz, E. Szczechowiak, Assessment of the air streams mixing in wall-type heat recovery units for ventilation of existing and refurbishing buildings toward low energy buildings, *Energy Build*. 227 (2020) 110427.
- [64] Ł. Amanowicz, K. Ratajczak, E. Dudkiewicz, Recent Advancements in Ventilation Systems Used to Decrease Energy Consumption in Buildings—Literature Review, *Energies (Basel)*. 16 (2023) 1–39.

- [65] T. Liberalesso, C. Oliveira Cruz, C. Matos Silva, M. Manso, Green infrastructure and public policies: An international review of green roofs and green walls incentives, *Land Use Policy*. 96 (2020) 104693.
- [66] Nowe rozporządzenie ustanawiające Program LIFE 2021-2027 - Ministerstwo Klimatu i Środowiska - Portal Gov.pl. <https://www.gov.pl/web/klimat/nowe-rozporzadzenie-ustanawiajace-program-life-2021-2027> (dostęp: luty 14, 2022).
- [67] Kożuchowski P, Kożuchowska E, Dach zielony - skuteczna metoda zabezpieczania pokryć hydroizolacyjnych, *Inżynier Budownictwa*. (2009) 86–90.
- [68] Gründach und Grüne Fassaden, Förderung von Begrüntem Fassaden. <https://www.hamburg.de/foerderung/13871398/foerderung-gruener-fassaden/> (dostęp: styczeń 25, 2022).
- [69] UCHWAŁA NR XV/268/15 RADY MIEJSKIEJ WROCŁAWIA z dnia 3 września 2015r. w sprawie zwolnień od podatku od nieruchomości powierzchni użytkowych lokali mieszkalnych w ramach projektu intensyfikacji powstawania terenów zieleni w obrębie Miasta Wrocławia.
- [70] UCHWAŁA NR XLVI/1192/21 RADY MIEJSKIEJ WROCŁAWIA z dnia 25 listopada 2021 r. zmieniająca uchwałę nr XV/268/15 Rady Miejskiej Wrocławia w sprawie zwolnień od podatku od nieruchomości powierzchni użytkowych lokali mieszkalnych w ramach projektu intensyfikacji powstawania terenów zieleni w obrębie Miasta Wrocławia.
- [71] L. Mazzeella, Energy retrofit of historic and existing buildings. the legislative and regulatory point of view, *Energy Build*. 95 (2015) 23–31.
- [72] A.L. Webb, Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 77 (2017) 748–759.
- [73] National Energy Conservation Agency, Manual of typology of residential buildings with examples of actions toward reduction of their energy use [Podręcznik typologii budynków mieszkalnych z przykładami działań mających na celu zmniejszenie ich energochłonności] (2011).
- [74] Wartości współczynnika lambda - współczynnik przewodzenia ciepła materiałów budowlanych - izosystems.pl. <https://izosystems.pl/content/16-wspolczynniki-lambda> (dostęp: styczeń 14, 2022).
- [75] Odporność ogniowa konstrukcji drewnianych - Inżynier Budownictwa. <http://inzynierbudownictwa.pl/odpornosc-ogniowa-konstrukcji-drewnianych/> (dostęp: Luty 14, 2022).

- [76] Izolacje : izolacje i zabezpieczenia : wydawnictwo techniczne R. 8, nr 2 (2003) | Polona. <https://polona.pl/item/izolacje-izolacje-i-zabezpieczenia-wydawnictwo-techniczne-r-8-nr-2-2003,MjAzOTU3OTc/0/#info:metadata> (dostęp: luty 14, 2022).
- [77] I. Adamczyk-Królak, Aerożele i pianki poliuretanowe - nowoczesne materiały termoizolacyjne w budownictwie, *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*. 2 (2015) 9–14.
- [78] E. Ryńska, Coraz bardziej SMART., *Architektura i Design*. (2015) 24–28.
- [79] T. Sternberg, H. Viles, A. Cathersides, Evaluating the role of ivy (*Hedera helix*) in moderating wall surface microclimates and contributing to the bioprotection of historic buildings, *Build Environ*. 46 (2011) 293–297.
- [80] Ustawa Prawo budowlane z późn. zm., n.d.
- [81] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [82] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [83] D.A. Krawczyk, Theoretical and real effect of the school's thermal modernization - A case study, *Energy Build*. 81 (2014) 30–37.
- [84] Fanger P.O., *Komfort cieplny*, Arkady (1974).
- [85] Słota Zbigniew, Istota zagrożenia obciążeniem termicznym. Przegląd i analiza obowiązujących przepisów oraz opracowań w zakresie identyfikacji i kwalifikacji zagrożenia klimatycznego pracowników podziemnych zakładów górniczych, *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa*. 51 (2013) 15–20.
- [86] Roghanchi Pedram, Sunkpal Maurice, Kocsis Karoly Charles, Understanding the Human Thermal Balance and Heat Stress Indices as They Apply to Deep and Hot US Mines, in: 15th North American Mine Ventilation Symposium (2015). <https://www.researchgate.net/publication/280683630>. Dostęp: kwiecień 11, 2022).
- [87] ANSI/ASHRAE Standard 55.
- [88] P.O. Fanger, Assessment of man's thermal comfort in practice, *Br J Ind Med*. 30 (1973) 313–324.
- [89] K. Parson, *Human Heat Stress*, CRC Press Taylor & Francis Group (2019).
- [90] M. Luo, Z. Wang, K. Ke, B. Cao, Y. Zhai, X. Zhou, Human metabolic rate and thermal comfort in buildings: The problem and challenge, *Build Environ*. 131 (2018) 44–52.

- [91] PN-EN ISO 7730 Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego.
- [92] ISO 8996 Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate.
- [93] PN-EN ISO 9920 Ergonomia środowiska termicznego - Szacowanie izolacyjności cieplnej i oporu pary wodnej zestawów odzieży.
- [94] Z. Słota, K. Słota, A. Morcinek-Słota, Redukcja obciążenia termicznego i poprawa warunków klimatycznych w kopalniach węgla - metody i środki profilaktyki, Wentylacja, Klimatyzacja, Odmetanowanie. (2018) 48–54.
- [95] I. Sudoł-Szopińska, I. Chojnacka, Określanie warunków komfortu termicznego w pomieszczeniach za pomocą wskaźników PMV i PPD, Bezpieczeństwo Pracy. 5 (2007).
- [96] D.A. Krawczyk, P. Zielinko, A. Rodero, Measurements of carbon dioxide concentration and temperature in dormitory rooms in Poland and Spain - A case study, IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 214 (2019).
- [97] M. Laska, E. Dudkiewicz, Research of CO<sub>2</sub> concentration in naturally ventilated lecture room, E3S Web of Conferences. 22 (2017).
- [98] K. Nowak-Dzieszko, T. Kisilewicz, Internal particulate matter pollution in educational building, E3S Web of Conferences. 172 (2020) 6–12.
- [99] B. Biernacka, Komfort cieplny a system ogrzewania – przegląd aktualnych badań, Rynek Instalacyjny. (2016) 41--47.
- [100] J. Li, B. Zheng, X. Chen, Z. Qi, K.B. Bedra, J. Zheng, Z. Li, L. Liu, Study on a full-year improvement of indoor thermal comfort by different vertical greening patterns, Journal of Building Engineering. 35 (2021).
- [101] A. Lis, Ocena wskaźników komfortu cieplnego ludzi w pomieszczeniach, Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce. Tom II (2007) 191–196.
- [102] D. Enescu, A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 79 (2017) 1353–1379.
- [103] L. Huang, Z. (John) Zhai, Critical review and quantitative evaluation of indoor thermal comfort indices and models incorporating solar radiation effects, Energy Build. 224 (2020).
- [104] EN 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.

- [105] M. Baborska-Narożny, M. Laska, N. Fidorów-Kaprawy, M. Mokrzecka, M. Małyszko, M. Smektała, M. Szulgowska-Zgrzywa, E. Stefanowicz, K. Piechurski, A. Chmielewska, A. Machyńska, M. Troszyński, Komponent badawczy Inicjatywy DiverCITY4. Raport z badań. (2020).
- [106] F. Nicol, M. Humphreys, S. Roaf, Adaptive thermal comfort: Principles and practice, *Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice*. (2012) 1–175.
- [107] D. Albadra, M. Vellei, D. Coley, J. Hart, Thermal comfort in desert refugee camps: An interdisciplinary approach, *Build Environ*. 124 (2017) 460–477.
- [108] H. Ritchie, M. Roser, Outdoor Air Pollution, *Our World in Data*. (2019). <https://ourworldindata.org/outdoor-air-pollution#6-of-global-deaths-are-attributed-to-outdoor-air-pollution>. (dostęp: marzec 18, 2022).
- [109] C.M. Profireoiu, D.A. Bodislav, S. Burlacu, C.V. Rădulescu, Challenges of sustainable urban development in the context of population growth, *European Journal of Sustainable Development*. 9 (2020) 51–57.
- [110] A. Russo, G.T. Cirella, Modern compact cities: How much greenery do we need?, *Int J Environ Res Public Health*. 15 (2018).
- [111] Certyfikacje wielokryterialne – PLGBC. <https://plgbc.org.pl/zrownowazone-budownictwo/certyfikacje-wielokryterialne/> (dostęp: luty 11, 2022).
- [112] C.J.L. Murray, A.Y. Aravkin, P. Zheng, i in., Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019, *The Lancet*. 396 (2020) 1223–1249.
- [113] Woloverton B.C., Johnson Anne, Bounds Keith, *Interior Landscape Plants for indoor air pollution abatement*. (1989).
- [114] X. Chen, T. Pei, Z. Zhou, M. Teng, L. He, M. Luo, X. Liu, Efficiency differences of roadside greenbelts with three configurations in removing coarse particles (PM10): A street scale investigation in Wuhan, China, *Urban For Urban Green*. 14 (2015) 354–360.
- [115] F. Fantozzi, F. Monaci, T. Blanusa, R. Bargagli, Spatio-temporal variations of ozone and nitrogen dioxide concentrations under urban trees and in a nearby open area, *Urban Clim*. 12 (2015) 119–127.
- [116] H.L. Brantley, G.S.W. Hagler, P. J. Deshmukh, R.W. Baldauf, Field assessment of the effects of roadside vegetation on near-road black carbon and particulate matter, *Science of The Total Environment*. 468–469 (2014) 120–129.

- [117] T.E. Morakinyo, Y.F. Lam, S. Hao, Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: Modelling and measurement, *J Environ Manage.* 182 (2016) 595–605.
- [118] G.A. Ganesh, S.L. Sinha, T.N. Verma, S.K. Dewangan, Investigation of indoor environment quality and factors affecting human comfort: A critical review, *Build Environ.* 204 (2021).
- [119] M. Frontczak, P. Wargocki, Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments, *Build Environ.* 46 (2011) 922–937.
- [120] M. Baborska-Narozny, F. Stevenson, P. Chatterton, Temperature in housing: Stratification and contextual factors, in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, ICE Publishing. (2016) 125–137.
- [121] M. Radić, M.B. Dodig, T. Auer, Green facades and living walls-A review establishing the classification of construction types and mapping the benefits, *Sustainability (Switzerland)*. 11 (2019).
- [122] V. Oquendo-Di Cosola, F. Olivieri, L. Ruiz-García, A systematic review of the impact of green walls on urban comfort: temperature reduction and noise attenuation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 162 (2022) 112463.
- [123] S.M. Wahba, B.A. Kamel, K.M. Nassar, A.S. Abdelsalam, Effectiveness of Green Roofs and Green Walls on Energy Consumption and Indoor Comfort in Arid Climates, *Civil Engineering Journal.* 4 (2018) 2284.
- [124] M. Musy, L. Malys, C. Inard, Assessment of Direct and Indirect Impacts of Vegetation on Building Comfort: A Comparative Study of Lawns, Green Walls and Green Roofs, *Procedia Environ Sci.* 38 (2017) 603–610.
- [125] L. Malys, M. Musy, C. Inard, Direct and indirect impacts of vegetation on building comfort: A comparative study of lawns, greenwalls and green roofs, *Energies (Basel)*. 9 (2016).
- [126] J. Kim, T. Hong, J. Jeong, C. Koo, K. Jeong, An optimization model for selecting the optimal green systems by considering the thermal comfort and energy consumption, *Appl Energy.* 169 (2016) 682–695.
- [127] W.A. Gibbly, United States Patent Number: 4822594. (1973).
- [128] L. Škerget, A. Tadeu, J. Almeida, Unsteady coupled moisture and heat energy transport through an exterior wall covered with vegetation, *Energies (Basel)*. 14 (2021) 1–26.
- [129] O.M. Tzuc, O.R. Gamboa, R.A. Rosel, M.C. Poot, H. Edelman, M. Jim, A. Bassam, Modeling of hygrothermal behavior for green facade 's concrete wall exposed to nordic

- climate using artificial intelligence and global sensitivity analysis, *Journal of Building Engineering* 33. 33 (2021).
- [130] P. Bieranowski, Współczynnik przenikania ciepła w świetle nowego Rozporządzenia Ministra Transportu. Część 1, *Budownictwo Energooszczędne*. 2 (2014) 16–21.
- [131] D.M. Gates, *Biophysical Ecology*, Springer-Verlag. (1980).
- [132] Gaylon S. Campbell, *An Introduction to Environmental Biophysics*. (1988).
- [133] D. Gawin, E. Kossecka, *Komputerowa Fizyka Budowli - Program komputerowy WUFI i jego zastosowanie w analizach ciepłno-wilgotnościowych przegród budowlanych*, (2007).
- [134] H.M. Künzl, *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. (1995).
- [135] J. Radoń, Opracowanie i walidacja modelu obliczeniowego mikroklimatu pomieszczeń w ramach projektu “IEA ANNEX 41,” *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*. (2005) 281–289.
- [136] PN-ISO 7726 Ergonomia środowiska termicznego. Przyrządy do pomiaru wielkości fizycznych.
- [137] B.J. Litke, *Gazy wilgotne, Problemy Nauk Stosowanych*. Tom 10 (2019) 63–68.
- [138] *BUDOWNICTWO OGÓLNE*, Tom 2, *Fizyka budowli*. (2010).
- [139] F.R. d’Ambrosio Alfano, M. Dell’Isola, B.I. Palella, G. Riccio, A. Russi, On the measurement of the mean radiant temperature and its influence on the indoor thermal environment assessment, *Build Environ*. 63 (2013) 79–88.
- [140] T. Cholewa, A. Siuta-Olcha, A. Smolarz, P. Muryjas, P. Wolszczak, R. Anasiewicz, C.A. Balaras, A simple building energy model in form of an equivalent outdoor temperature, *Energy Build*. 236 (2021) 110766.
- [141] J. Monteith, M. Unsworth, *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere: Fourth Edition*, *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere: Fourth Edition*. (2013) 1–401.
- [142] R. Tang, Y. Etzion, I.A. Meir, Estimates of clear night sky emissivity in the Negev Highlands, Israel, *Energy Convers Manag*. 45 (2004) 1831–1843.
- [143] P. Struzik, *Acta Universitatis Wratislaviensis*, (1995).
- [144] G. Pérez, J. Coma, M. Chàfer, L.F. Cabeza, Seasonal influence of leaf area index (LAI) on the energy performance of a green facade, *Build Environ*. 207 (2022).



- [145] H. Edelman, T. Pakkala, E. Tuominen, A. Köliö, M. Jauni, M. Pentti, M. Kiviste, J. Vinha, S. Lehvävirta, Moisture safety of green facades, *Alue Ja Ympäristö*. 48 (2019) 55–68.
- [146] G.S. Campbell, J.M. Norman, *An Introduction to Environmental Biophysics*,. (1998).
- [147] R. Srinet, S. Nandy, N.R. Patel, Estimating leaf area index and light extinction coefficient using Random Forest regression algorithm in a tropical moist deciduous forest, India, *Ecol Inform*. 52 (2019) 94–102.
- [148] PN-EN ISO 6946, Komponenty budowlane i elementy budynku -- Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła -- Metody obliczania.
- [149] Garbalińska, Związek między izotermą sorpcji a współczynnikiem przewodzenia ciepła cegły silikatowej, *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*. (2008) 5–10.
- [150] Absorbed Solar Radiation, (n.d.). [https://www.engineeringtoolbox.com/solar-radiation-absorbed-materials-d\\_1568.html](https://www.engineeringtoolbox.com/solar-radiation-absorbed-materials-d_1568.html) (dostęp: luty 22, 2022).
- [151] G. Bartnicki, B. Nowak, *Termowizja w ogrzewnictwie, Rynek Instalacyjny*. (2010).
- [152] Certyfikaty energetyczne - Współczynniki przewodzenia ciepła. Świadectwo energetyczne budynku. [http://www.certyfikat-energetyczny.powiat.pl/CE\\_P/wspolczynniki\\_przewodzenia.html](http://www.certyfikat-energetyczny.powiat.pl/CE_P/wspolczynniki_przewodzenia.html) (dostęp: luty 22, 2022).
- [153] W. Krywicki, J. Bartos, W. Dyczka, K. Królikowska, M. Wasilewski, *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Część II statystyka matematyczna*, Wydanie VI, Wydawnictwo Naukowe PWN (1999).
- [154] P. Baranowski, W. Mazurek, R.T. Walczak, *Zastosowanie termografii do badania stresu wodnego roślin i ewapotranspiracji*, 1999.
- [155] W. Mazurek, P. Baranowski, *Odwzorowania termalne powierzchni roślin*, *Acta Agrophysica*. (2002) 131–139.
- [156] E. Gąsiorek, J. Kamińska, E. Musiał, *Modelowanie ewapotranspiracji wskaźnikowej w różnych regionach Polski*, *Infrastruktura I Ekologia Terenów Wiejskich Infrastructure and Ecology of Rural Areas*. (2008) 69–80.
- [157] C. Zhao, L. Zhang, Y. Yang, Y. Zhang, M. Liu, J. Yan, L. Zhao, Long-wave infrared radiation properties of vertical green façades in subtropical regions, *Build Environ*. 223 (2022).
- [158] L. Evangelisti, C. Guattari, F. Asdrubali, On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance: A critical review, *Energy Build*. 183 (2019) 607–625.

- [159] M. Kusy, Analiza rozkładów i symulacje Analiza rozkładów, StatSoft Polska. (2011) 57–68.
- [160] PN-EN ISO 13788 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku - Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej - Metody obliczania.
- [161] intro – Meteonorm. <https://meteonorm.com/en/> (dostęp: luty 3, 2023).
- [162] PN-EN 12831, Instalacje ogrzewcze w budynkach -- Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego.
- [163] R. De Bei, S. Fuentes, M. Gilliam, S. Tyerman, E. Edwards, N. Bianchini, J. Smith, C. Collins, Viticanopy: A free computer app to estimate canopy vigor and porosity for grapevine, Sensors (Switzerland). 16 (2016).
- [164] D. Zirkelbach, B. Schafaczek, H. Künzle, Thermal Performance Degradation of Foam Insulation in Inverted Roofs Due to Moisture Accumulation, International Conference on Durability of Building Materials and Components. (2011) 1–8.
- [165] M. Baborska-Narożny, M. Laska, N. Fidorów-Kaprawy, M. Mokrzecka, M. Małyszko, M. Smektała, E. Stefanowicz, K. Piechurski, Thermal comfort and transition from solid fuel heating in historical multifamily buildings — real-world study in Poland, Energy and Buildings (2021).
- [166] M. Baborska-Narożny, M. Szulgowska-Zgrzywa, E. Stefanowicz, K. Piechurski, N. Fidorów-Kaprawy, M. Laska, M. Mokrzecka, M. Małyszko, A. Chmielewska, M. Smektała, A. Machyńska, Komponent badawczy Inicjatywy DiverCITY4. Raport z badań. (2020).
- [167] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 62: Ventilation for Acceptable, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2001).
- [168] Wrocławska Rewitalizacja, O kamienicach. Jak mądrze zaplanować remont (2019).
- [169] Internetowy Podręcznik Statystyki, (2023). <https://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>.

## 16. Spis rysunków

Rysunek 1 Klasyfikacja zielonych ścian (opracowane i tłumaczenie własne na podstawie [28,30]).....	20
Rysunek 2 Miejska wyspa ciepła (opracowanie własne).....	30
Rysunek 3 Popularne materiały izolacyjne (opracowanie własne).....	36
Rysunek 4 Bilans cieplny organizmu (opracowanie własne na podstawie [85,87]).....	40
Rysunek 5 Rozprzestrzenianie się i wpływ zanieczyszczeń drogowych (opracowanie własne na podstawie [47]) a) na nieosłonięty budynek, b) budynek osłonięty drzewami, c) budynek osłonięty krzewami, d) budynek osłonięty roślinnością, e) nieosłoniętych pieszych, f) pieszych osłoniętych drzewami, g) pieszych osłoniętych krzewami, pieszych osłoniętych ekranami z roślinności.....	50
Rysunek 6 Składowe bilansu ciepła dla ściany z roślinnością (opracowanie własne na podstawie [13]).....	54
Rysunek 7 Schemat obliczeń wymiany ciepła przez przegrodę z roślinnością na ścianie zewnętrznej (opracowanie własne na podstawie [13]).....	63
Rysunek 8 Sieć węzłów cieplnych żyjącej ściany [15] (tłumaczenie własne).....	66
Rysunek 9 Uproszczony schemat blokowy obliczeń w programie WUFI Plus (opracowanie własne na podstawie [133,135]).....	68
Rysunek 10 Schemat stanowiska badawczego; po lewej – budynek z warstwą roślinności, po prawej – bez roślinności. Czujnik żółty – pomiar temperatury, niebieski – temperatury powierzchni ściany, zielony – temperatury (opracowanie własne).....	71
Rysunek 11 Przekrój zewnętrznej ściany budynku, fragment (opracowanie własne), 1-tynk, 2-cegła pełna, 3-pustka powietrzna wypełniona punktowo pianą poliuretanową, 4-tynk, 5-gładź.....	94
Rysunek 12 Uproszczony schemat blokowy obliczeń modelu statystycznego przepływu ciepła przez przegrodę z roślinnością (opracowanie własne).....	102
Rysunek 13 Uproszczony schemat przeprowadzonych modyfikacji (opracowanie własne). 113	
Rysunek 14 Schemat obliczeń wymiany ciepła przez przegrodę z roślinnością z zastosowanymi modyfikacjami do modelu (opracowanie własne na podstawie [13]).....	115
Rysunek 15 Model 3D bryły budynku objętego opracowaniem (opracowanie własne w programie <i>SketchUp</i> ).....	118
Rysunek 16 Fragment okna programu <i>WUFI Plus</i> opisujący dane klimatyczne oraz symulowana strefa budynku objętego analizą (opracowanie własne w <i>WUFI Plus</i> ).....	119

Rysunek 17 Fragment okna programu <i>Excel</i> oraz makra w środowisku <i>Visual Basic</i> (opracowanie własne w programie <i>Excel</i> na podstawie [91]).....	131
Rysunek 18 Podgląd ankiety wykonanej w formie on-line (opracowanie własne w questionpro.com).....	135

## 17. Spis wykresów

Wykres 1 Profile temperatury i prędkości powietrza dla różnych typów zielonej ściany [45] (tłumaczenie własne).....	26
Wykres 2 Udział energii odnawialnej w końcowym zużyciu energii brutto w Polsce w latach 2004 - 2021 (opracowanie własne na podstawie [61]).....	31
Wykres 3 Budynki mieszkalne w Polsce według daty budowy, dane na rok 2017 (opracowanie własne na podstawie [1]).....	34
Wykres 4 Wpływ pokrycia biologicznego na współczynnik przenikania ciepła dla ściany zewnętrznej w okresie zimnym (opracowanie własne na podstawie [9]) .....	37
Wykres 5 Zależność temperatury odczuwalnej od średniej temperatury powietrza i temperatury powierzchni przegród otaczających, wykres Köeniga [99].....	44
Wykres 6 Wskaźnik <i>PPD</i> w funkcji <i>PMV</i> [91].....	46
Wykres 7 Wartość wskaźnika odsetka osób niezadowolonych z warunków termicznych zamodelowana dla okresu całorocznego w przypadku budynku istniejącego oraz najpopularniejszych systemów zastosowania roślin na tym samym obiekcie [126] (tłumaczenie własne) .....	53
Wykres 8 Zmienność temperatury powietrza zewnętrznego i powietrza w warstwie roślinności (opracowanie własne).....	78
Wykres 9 Zmienność temperatury zewnętrznej powierzchni ściany i powietrza w warstwie roślinności (opracowanie własne) .....	79
Wykres 10 Zmienność zawartości wilgoci w powietrzu oraz temperatury wewnętrznej powierzchni ściany z roślinnością (opracowanie własne).....	81
Wykres 11 Zmienność zawartości wilgoci w powietrzu oraz zamodelowanej temperatury wewnętrznej powierzchni ściany bez roślinności (opracowanie własne) .....	82
Wykres 12 Temperatura powietrza w pomieszczeniach budynków z roślinnością i bez niej (opracowanie własne).....	83

Wykres 13 Rozrzuty ukazujące powiązania temperatury powietrza i wilgotności względnej w pomieszczeniu a temperatury promieniowania w budynku z warstwą roślinności (opracowanie własne w programie Statistica).....	84
Wykres 14 Zmienność zamodelowanej (statystycznie) temperatury promieniowania oraz temperatury powietrza w pomieszczeniu budynku z warstwą roślinności na ścianie (opracowanie własne).....	85
Wykres 15 Zmienność zamodelowanej (statystycznie) temperatury promieniowania oraz temperatury powietrza w pomieszczenia budynku bez warstwy roślinności na ścianie (opracowanie własne).....	86
Wykres 16 Zmienność wskaźnika <i>LAI</i> w zależności od ekspozycji oraz dnia w roku [144] (tłumaczenie własne).....	89
Wykres 17 Zmienność wskaźnika <i>LAI</i> w okresie zimnym dla zielonej ściany objętej opracowaniem (opracowanie własne na podstawie obserwacji i danych literaturowych [144]) .....	91
Wykres 18 Różnice między gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą - weryfikacja modelu [13] (opracowanie własne) .....	98
Wykres 19 Różnice między gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą obliczone na podstawie pomierzonych danych i modelu [13] w zależności od natężenia promieniowania słonecznego dla jego różnych zakresów (opracowanie własne) .....	101
Wykres 20 Zależność między uzyskaną medianą (punkty centralne) różnic gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianę obliczona na podstawie modelu [13] a natężeniem promieniowania słonecznego (opracowanie własne) .....	101
Wykres 21 Różnice między uzyskaną medianą różnic gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą obliczona na podstawie modelu [13] (punkty centralne) z uwzględnieniem różnych zakresów <i>LAI</i> a natężeniem promieniowania słonecznego (opracowanie własne) ..	103
Wykres 22 Różnice między uzyskaną medianą różnic gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą obliczona na podstawie modelu [13] (punkty centralne) z uwzględnieniem różnych zakresów <i>LAI</i> a natężeniem promieniowania słonecznego po modyfikacjach, niebieski – model bazowy, granatowy – modyf. 1, żółty – modyf. 2, czerwony – modyf. 3, zielony – modyf. 4, szary – modyf. 5 (opracowanie własne) .....	108
Wykres 23 Wykres kwantylowy dla danych różnic gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą (na podstawie modyf. 5 modelu) na poziomie ufności 95% a) $0 \leq LAI < 1$ , b) $1 \leq LAI < 2$ , c) $2 \leq LAI < 3$ , d) $3 \leq LAI < 4$ (opracowanie własne w programie Statistica).....	109

Wykres 24 Badanie rozkładu normalnego dla różnic gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą dla a) $0 \leq LAI < 1$ , b) $1 \leq LAI < 2$ , c) $2 \leq LAI < 3$ , d) $3 \leq LAI < 4$ (opracowanie własne w programie Statistica).....	110
Wykres 25 Wykres kwantylowy dla różnic gęstości strumienia ciepła przez warstwę roślinności a ścianą uzyskanych na podstawie modyfikacji oraz wprowadzonych parametrów empirycznych modelu na poziomie ufności 95% a) $0 \leq LAI < 1$ , b) $1 \leq LAI < 2$ , c) $2 \leq LAI < 3$ , d) $3 \leq LAI < 4$ (opracowanie własne w programie Statistica) .....	112
Wykres 26 Gęstości strumienia ciepła docierającego do właściwej przegrody budynku przez warstwę roślinności i w przypadku jej braku obliczone na podstawie pomierzonych danych i zmodyfikowanego modelu (opracowanie własne).....	116
Wykres 27 Gęstości strumienia ciepła docierającego do właściwej przegrody budynku bez roślinności obliczone na podstawie pomierzonych danych wprowadzonych do modelu [13] (opracowanie własne).....	117
Wykres 28 Wyznaczone na podstawie symulacji wskaźniki <i>PMV</i> dla pomieszczenia ze ścianami zewnętrznymi z wypełnioną pustką powietrzną w budynku warstwą roślinności i bez roślinności na ścianach (opracowanie własne na podstawie obliczeń w <i>WUFI Plus</i> ).....	124
Wykres 29 Zależność średniej temperatury powietrza i temperatury powierzchni przegród otaczających dla pomieszczenia a) z roślinnością i wypełnioną pustką powietrzną, b) bez roślinności z wypełnioną pustką powietrzną, c) z roślinnością i pustką powietrzną, d) bez roślinności i z pustką powietrzną, obszar zielony – strefa komfortu, obszar pomarańczowy – strefa bliska komfortu (opracowanie własne na podstawie obliczeń w <i>WUFI Plus</i> ).....	125
Wykres 30 Rozkład temperatur $T_{inbw}$ - w pomieszczeniu bez warstwy roślinności na ścianach, $T_{insbw}$ - powierzchni ściany zewnętrznej w budynku bez warstwy roślinności na ścianach, $T_{invw}$ - w pomieszczeniu za warstwą roślinności, $T_{insvw}$ - powierzchni ściany zewnętrznej w budynku za warstwą roślinności (opracowanie własne w programie Statistica) .....	127
Wykres 31 Rozkład wilgotności względnej $RH_{inbw}$ - w pomieszczeniu bez warstwy roślinności na ścianach, $RH_{invw}$ - w pomieszczeniu za warstwą roślinności (opracowanie własne w programie Statistica).....	128
Wykres 32 Zależność temperatury odczuwalnej od średniej temperatury powietrza i temperatury powierzchni przegród otaczających dla pomiarów krótkoterminowych przeprowadzonych w budynkach z roślinnością na ścianach i bez (opracowanie własne)....	130
Wykres 33 Wskaźnik <i>PMV</i> w funkcji temperatury operatywnej (opracowanie własne).....	133

Wykres 34 Zmienność temperatury powietrza, operatywnej oraz średniej temperatury promieniowania w okresie pomiarowym dla budynku z warstwą roślinności na ścianach (opracowanie własne).....	133
Wykres 35 Zmienność temperatury powietrza, operatywnej oraz średniej temperatury promieniowania w okresie pomiarowym dla budynku bez roślinności na ścianach (opracowanie własne) .....	134
Wykres 36 Poziom odczuć i preferencje cieplne deklarowane przez użytkowników badanych lokali w ramach ankietyzacji (opracowanie własne).....	136

## 18. Spis tabel

Tabela 1 Przykładowe uśrednione masy i koszty zielonej ściany (opracowane na podstawie [6,53,54]).....	27
Tabela 2 Rośliny i ich wymagania najczęściej stosowane do budowy zielonych fasad w klimacie polskim umiarkowanym (opracowanie własne na podstawie [31]) .....	29
Tabela 3 Zestawienie liczby działań motywacyjnych na świecie na podstawie literatury, dane do roku 2018 (tłumaczenie własne na podstawie [65]).....	32
Tabela 4 Właściwości niektórych materiałów i przykładowe wartości charakterystycznych parametrów każdego z nich (opracowanie własne na podstawie [74–76]).....	35
Tabela 5 Wartości współczynnika przenikania ciepła dla ściany zewnętrznej według roku oddania budynku do użytkowania (opracowanie własne na podstawie [73,82]).....	38
Tabela 6 Wartości tempa metabolizmu według normy <i>PN-EN ISO 7730</i> [91] .....	41
Tabela 7 Izolacyjność cieplna odzieży według normy <i>PN-EN ISO 9920</i> [93] .....	42
Tabela 8 Skala odczuć termicznych wskaźnika <i>PMV</i> na podstawie normy <i>PN-EN ISO 7726</i> [91] .....	45
Tabela 9 Kategorie budynków zgodne z normą <i>PN-EN 15251</i> [104].....	47
Tabela 10 Standardowe scenariusze projektowe dotyczące zastosowania roślinności na przegrodach budynków [126] (tłumaczenie własne) .....	52
Tabela 11 Zestawienie oraz dokładny opis elementów urządzenia do pomiarów mikroklimatu (dane producenta).....	75
Tabela 12 Korelacje pomiędzy zmiennymi przyjętymi w modelu a gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności (na podstawie modelu [13]) dla $\alpha = 0,05$ . Korelacje wyznaczone na bazie 29500 pomiarów (opracowanie własne w programie Statistica) .....	96

Tabela 13 Korelacje pomiędzy zmiennymi przyjętymi w modelu a gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności z uwzględnieniem wskaźnika <i>LAI</i> dla $\alpha = 0,05$ . Korelacje wyznaczone na bazie 29500 pomiarów (opracowanie własne w programie Statistica).....	97
Tabela 14 Korelacje pomiędzy zmiennymi przyjętymi w modelu a gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności (na podstawie modyf. 1 modelu) dla $\alpha = 0,05$ . Korelacje wyznaczone na bazie 29500 pomiarów (opracowanie własne w programie Statistica) .....	104
Tabela 15 Korelacje pomiędzy zmiennymi przyjętymi w modelu a gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności (na podstawie modyf. 1 modelu) dla $\alpha = 0,05$ . Korelacje wyznaczone na bazie 29500 pomiarów oraz poszczególnych wartości <i>LAI</i> (opracowanie własne w programie Statistica).....	105
Tabela 16 Korelacje pomiędzy zmiennymi przyjętymi w modelu a gęstością strumienia ciepła przez warstwę roślinności (na podstawie modyf. 5 modelu) dla $\alpha = 0,05$ . Korelacje wyznaczone na bazie 29500 pomiarów oraz poszczególnych wartości <i>LAI</i> (opracowanie własne w programie Statistica).....	107
Tabela 17 Porównanie parametrów klimatu zewnętrznego dla <i>Meteonorm</i> oraz danych zarejestrowanych na stanowisku badawczym na budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej (opracowanie własne na podstawie zgromadzonych danych).....	120
Tabela 18 Średnie, minimalne oraz maksymalne wartości temperatury oraz zawartości wilgoci w danej warstwie ściany zewnętrznej z wypełnioną pustką powietrzną w okresie 01.10.2021-14.01.2022 (opracowanie własne w programie <i>WUFI Plus</i> ) .....	122
Tabela 19 Średnie, minimalne oraz maksymalne wartości temperatury oraz zawartości wilgoci w danej warstwie ściany zewnętrznej z pustką powietrzną w okresie 01.10.2021-14.01.2022 (opracowanie własne w programie <i>WUFI Plus</i> ) .....	123
Tabela 20 Parametry mikroklimatu w pomieszczeniach objętych badaniami zmierzone z wykorzystaniem kompleksowego urządzenia do pomiarów parametrów mikroklimatu (opracowanie własne).....	129



## 19. Spis zdjęć

Zdjęcie 1 Korzonki czepne winobluszczu (kolekcja autorki) .....	21
Zdjęcie 2 Muzeum CaixaForum, Madryt, Hiszpania ( <a href="https://www.verticalgardenpatrickblanc.com/realisations">https://www.verticalgardenpatrickblanc.com/realisations</a> ).....	23
Zdjęcie 3 Musée du Quai Branly, Paryż, Francja ( <a href="https://www.verticalgardenpatrickblanc.com/realisations">https://www.verticalgardenpatrickblanc.com/realisations</a> ).....	23
Zdjęcie 4 Bezpośrednia zielona ściana na budynku Muzeum Narodowego we Wrocławiu (kolekcja autorki) .....	23
Zdjęcie 5 Żyjąca ściana na terenie Urzędu Miejskiego we Wrocławiu (kolekcja autorki).....	23
Zdjęcie 6 Oficyna znajdująca w Przedmieściu Oławskim, Wrocław (kolekcja autorki).....	35
Zdjęcie 7 Obiekt objęty opracowaniem, elewacja południowa i zachodnia (kolekcja autorki)	70
Zdjęcie 8 Obiekt objęty opracowaniem, elewacja północna i wschodnia (kolekcja autorki) ..	70
Zdjęcie 9 Przykładowe elementy stanowiska badawczego: rejestrator, czujnik temperatury oraz wilgotności względnej (kolekcja autorki) .....	72
Zdjęcie 10 Przykładowe elementy stanowiska badawczego: czujnik temperatury powierzchni (kolekcja autorki) .....	72
Zdjęcie 11 Czujnik temperatury powierzchni (materiały producenta).....	74
Zdjęcie 12 Stanowiska do pomiaru parametrów mikroklimatu (kolekcja autorki).....	74
Zdjęcie 13 Stopień ulistnienia zielonej ściany w okresie zimowym 02.2022 (kolekcja autorki) .....	90
Zdjęcie 14 Konstrukcja ściany zewnętrznej budynku, w którym wykonano stanowisko pomiarowe (udostępnione przez właścicieli budynku) .....	93