POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych
Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza

mgr inż. Maria Teresa MAŁEK

WPŁYW PARAMETRÓW PRZEGRODY AKTYWOWANEJ TERMICZNIE NA KOMFORT CIEPLNY I ZUŻYCIE ENERGII

Rozprawa doktorska

Promotor: prof. dr hab. inż. Halina KOCZYK

Poznań, 2022

Serdecznie dziękuję Pani prof. dr hab. inż. Halinie Koczyk
za poświęcony czas, cierpliwość oraz przyjazną atmosferę
podczas pisania niniejszej pracy.

Składam serdeczne podziękowania dla wszystkich pracowników
firmy Peri oraz firmy Intech Sp. z o.o.
uczestniczących w budowie, transporcie, montażu
oraz wszelkich pracach przy konstrukcji obudowy stanowiska pomiarowego.

Dziękuję moim Rodzicom oraz Siostrom: Zofii z mężem Kamilem oraz Annie
za miłość, wiarę we mnie, zrozumienie i wsparcie.

Moją rozprawę doktorską dedykuję
Moim Najbliższym
ze szczególną dedykacją
Dla Mojej Siostry Anny

Spis treści

Streszczenie 5
Abstract 5
Wykaz ważniejszych oznaczeń 6
1. Wstęp 8
1.1. Wprowadzenie 8
1.2. Uzasadnienie na podstawie danych literaturowych 8
1.3. Uzasadnienie na podstawie obliczeń 16
2. Podstawowe tezy pracy, jej cel i zakres 23
3. Aktualny stan badań na temat przegród aktywowanych termicznie 24
3.1. Wyniki modelowania i pomiarów eksperymentalnych w obiektach i komorach klimatycznych 24
3.2. Wyniki badań doświadczalnych przegród aktywowanych termicznie 29
4. Model ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie 31
4.1. Charakterystyka i klasyfikacja metod numerycznych 31
4.2. Wybór metody numerycznej MBE (metody bilansów elementarnych) 31
4.3. Model przewodzenia ciepła w przegrodzie 32
4.4. Wyniki obliczeń z modelu numerycznego 51
4.4.1. Stabilizacja temperatury na powierzchni przegrody 51
4.4.2. Przebieg temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni 53
4.4.3. Wymuszenie skokowe temperatury zewnętrznej 54
5. Badania eksperymentalne 56
5.1. Opis stanowiska badawczego 56
5.2. Wyznaczenie odchyłek czujników temperatury 69
5.3. Opis przebiegu badań 74
5.4. Opracowanie rezultatów pomiarów doświadczalnych 74
5.4.1. Stabilizacja temperatury na powierzchni przegrody 75
5.4.2. Przebieg temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni 78
5.4.3. Wymuszenie skokowe temperatury zewnętrznej 85
6. Porównanie modelu numerycznego z badaniami doświadczalnymi 93
6.1. Stabilizacja temperatury na powierzchni przegrody 94
6.2. Przebieg temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni 112

6.3. Wymuszenie skokowe temperatury zewnętrznej 130
6.4. Wnioski 148
7. Symulacja stanów eksploatacyjnych systemu opartego na ścianie zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie w programie TRNSYS 149
7.1. Opis budynku wprowadzonego do programu SketchUp i TRNSYS 149
7.2. Przegroda aktywowana termicznie a zużycie energii 150
7.2.1. Zużycie energii a temperatura zasilania elementu aktywowanego termicznie w ścianie zewnętrznej 151
7.2.2. Zużycie energii a grubość betonu 158
7.2.3. Zużycie energii a grubość styropianu 167
7.2.4. Zużycie energii a współczynnik przewodzenia ciepła styropianu 176
7.2.5. Wnioski 185
8. Przegroda aktywowana termicznie a komfort cieplny 187
8.1. Stosowane wskaźniki oceny komfortu cieplnego 187
8.2. Analizowane przypadki 187
8.2.1. Komfort cieplny a temperatura zasilania elementu aktywowanego termicznie w ścianie zewnętrznej 188
8.2.2. Komfort cieplny a grubość betonu 189
8.2.3. Komfort cieplny a grubość styropianu 197
8.2.4. Komfort cieplny a współczynnik przewodzenia ciepła styropianu 205
8.2.5. Wnioski 213
9. Podsumowanie 217
9.1. Wnioski końcowe 217
9.2. Potencjał naukowy do kolejnych badań i analiz 220
10. Literatura 221

Streszczenie

Tematem rozprawy doktorskiej jest wpływ parametrów przegrody aktywowanej termicznie na komfort cieplny i zużycie energii. W pierwszej kolejności wykonano przegląd literatury mający na celu uzasadnienie podjęcia tematu oraz określenie aktualnego stanu badań w tematyce rozprawy.

W następnej części przedstawiono tezę pracy, jej cel i zakres. Tezę pracy sformułowano jako stwierdzenie, że przegroda aktywowana termicznie dokładniej ściana zewnętrzna zmniejsza zużycie energii i zapewnia komfort cieplny, natomiast celem było sprawdzenie parametrów przegrody aktywowanej termicznie (czynników budowlanych i instalacyjnych).

Chcąc uzasadnić postawioną tezę wykonano model ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie, którego wyniki porównano z rezultatami zarejestrowanymi podczas badań doświadczalnych. Pomiary wykonano na skonstruowanym specjalnie do tego celu stanowisku badawczym, którego głównym elementem była betonowa ściana z umieszczoną we wnętrzu jej konstrukcji pętlą przewodów.

W następnej części pracy wykonano symulacje stanów eksploatacyjnych systemu opartego na ścianie zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie pod kątem zużycia energii i komfortu cieplnego w programie TRNSYS.

W podsumowaniu wskazano czynniki instalacyjne jako istotne dla komfortu cieplnego i zużycia energii, natomiast czynniki budowlane ściślej warstwy konstrukcyjnej jako mniej znaczące.

Abstract

The subject of the doctoral dissertation is the influence of the parameters of a thermally activated of building structure on thermal comfort and energy consumption. First, a literature review was carried out to justify the topic and to determine the current state of research in the subject of the dissertation.

The next part presents the thesis of the dissertation, its purpose and scope. The thesis of the work was formulated as a statement that thermally activated building structure, more precisely, an external wall reduces energy consumption and maintains thermal comfort, while the aim was to check the parameters of a thermally activated building structure (construction and installation factors).

In order to justify the thesis, a model of the external wall was made with a thermally activated element, the results of which were compared with the results recorded during the experimental tests. Measurements were made on a specially designed test stand, the main element of which was a concrete wall with a loop of pipes placed inside its structure.

In the next part of the work, simulations of the operating states of a system based on an external wall with a thermally activated element in terms of energy consumption and thermal comfort were performed in the TRNSYS program.

In summary, installation factors are indicated as important for thermal comfort and energy consumption, while building factors, more closely, of the construction layer as less significant.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

Symbol	Opis	Jednostka
a	współczynnik wyrównania temperatury	$[m^2/s]$
A	powierzchnia wymiany ciepła pomiędzy danymi segmentami	$[m^2]$
Alb	albedo	[-]
Alb_s	albedo styropianu	[-]
c	ciepło właściwe materiału	[J/(kg·K)]
c_b	ciepło właściwe betonu	[J/(kg·K)]
c_s	ciepło właściwe styropianu	[J/(kg·K)]
d_b	grubość warstwy betonu	[m]
d_j	grubość warstwy materiału j	[m]
d_p	grubość ścianki przewodu	[m]
d_s	grubość warstwy styropianu	[m]
d_{wew}	średnica wewnętrzna przewodu	[m]
f	współczynnik tarcia	[-]
G_c	całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię pionową	$[W/m^2]$
m	masa komórki bilansowej	[kg]
Nu	liczba Nusselta	[-]
Pr	liczba Prandtla	[-]
$q_{płynu}$	gęstość strumienia ciepła *(dla płynu)*	$[W/m^2]$
$\dot{q}$	gęstość strumienia ciepła *(dla przegrody)*	$[W/m^2]$
$\dot{q}_{wew}$	gęstość strumienia ciepła po stronie wewnętrznej *(dla przegrody)*	$[W/m^2]$
$\dot{q}_{zew}$	gęstość strumienia ciepła po stronie zewnętrznej *(dla przegrody)*	$[W/m^2]$
$\dot{Q}$	strumień ciepła	[W]
R	opór cieplny między danymi segmentami	$[m^2·K/W]$
Re	liczba Reynoldsa	[-]
R_{se}	opór przejmowania ciepła na zewnętrznej stronie przegrody	$[m^2·K/W]$
R_{si}	opór przejmowania ciepła na wewnętrznej stronie przegrody	$[m^2·K/W]$
T_e	temperatura zewnętrzna	[K]
T_i	temperatura wewnętrzna	[K]
T_n	temperatura na powierzchni pętli	[K]
$T_{płynu}$	średnia temperatura czynnika grzewczego	[K]
$T_{x,y}$	temperatura w węźle o współrzędnych x,y	[K]
$T^+_{x,y}$	temperatura w węźle na końcu kroku czasowego	[K]
U	współczynnik przenikania ciepła	$[W/(m^2·K)]$
U_{wew}	współczynnik przenikania ciepła po stronie wewnętrznej	$[W/(m^2·K)]$
U_{zew}	współczynnik przenikania ciepła po stronie zewnętrznej	$[W/(m^2·K)]$
w	prędkość	[m/s]
α_{ce}	współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję na zewnętrznej stronie przegrody	$[W/(m^2·K)]$
α_{ci}	współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję na wewnętrznej stronie przegrody	$[W/(m^2·K)]$
$\alpha_{płynu}$	współczynnik przejmowania ciepła czynnika grzewczego (płynu)	$[W/(m^2·K)]$
α_{re}	współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie na zewnętrznej stronie przegrody	$[W/(m^2·K)]$

Wykaz ważniejszych oznaczeń c.d.

Symbol	Opis	Jednostka
α_{ri}	współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie na wewnętrznej stronie przegrody	[W/(m^2·K)]
ΔT	przyrost temperatury w komórce bilansowej	[K]
ΔT_j	różnica temperatur między segmentami	[K]
Δx	krok przestrzenny w kierunku osi x	[m]
Δy	krok przestrzenny w kierunku osi y	[m]
$\Delta \tau$	krok czasowy	[s]
$\Delta \tau_{max}$	dopuszczalna wartość kroku czasowego	[s]
ε_1	emisyjność powierzchni pierwszego ciała	[-]
ε_2	emisyjność powierzchni drugiego ciała	[-]
ε_{1-2}	emisyjność wzajemna	[-]
λ	współczynnik przewodzenia ciepła materiału	[W/(m·K)]
λ_b	współczynnik przewodzenia ciepła betonu	[W/(m·K)]
λ_p	współczynnik przewodzenia ciepła materiału przewodu	[W/(m·K)]
$\lambda_{płynu}$	współczynnik przewodzenia ciepła czynnika grzewczego (płynu)	[W/(m·K)]
λ_s	współczynnik przewodzenia ciepła styropianu	[W/(m·K)]
ν	współczynnik lepkości kinematycznej	[m^2/s]
ρ	gęstość materiału	[kg/m^3]
ρ_b	gęstość betonu	[kg/m^3]
ρ_s	gęstość styropianu	[kg/m^3]
σ	stała promieniowania ciała doskonale czarnego (stała Stefana-Boltzmanna)	[W/(m^2·K^4)]

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Aktualna tendencja polegająca na ograniczeniu zużycia energii i wykorzystaniu odnawialnych źródeł wzmaga zainteresowanie rozwiązaniami budynków energooszczędnych uniezależnionych od paliw kopalnych. Jednocześnie ulegają przyśpieszeniu działania termomodernizacyjne obejmujące:

- głęboką termomodernizację budowlaną polegającą na ociepleniu przegród nieprzezroczystych i wymianie okien oraz zastosowaniu osłon i urządzeń ochrony przeciwsłonecznych (żaluzji zewnętrznych i wewnętrznych, rolet, zasłon itp.).
  Działania te zmniejszają podczas sezonu grzewczego straty ciepła przez przenikanie i zapotrzebowanie energii użytkowej na cele ogrzewania, a w okresie letnim ograniczają słoneczne zyski ciepła i zapotrzebowanie energii użytkowej na cele chłodzenia.
- termomodernizację instalacyjną, która polega na modernizacji lub wymianie elementów stanowiących system ogrzewania i/lub system chłodzenia.

Działania te mają na celu dostosowanie wydajności źródeł energii do zmniejszonego zapotrzebowania, podwyższenie sprawności systemów opartej na podwyższeniu sprawności cząstkowych elementów składowych systemów, a więc sprawności wytwarzania, dystrybucji, akumulacji i przekazywania do pomieszczeń.

Ograniczenie strat ciepła przez przenikanie przez przegrody zewnętrzne nieprzezroczyste najczęściej odbywa się poprzez zastosowanie izolacji: tradycyjnej, transparentnej lub próżniowej. Stosowanie izolacji tradycyjnej wymaga znacznej jej grubości dla utrzymania wymaganych, zgodnie z Rozporządzeniem o warunkach technicznych [1].

Takie rozwiązania dla budynków nowych, które pozwalają zrealizować ideę małych strat ciepła przez przenikanie oraz współpracę z nowoczesnym najczęściej lokalnym, czyli niewymagającym doprowadzenia nośnika z zewnątrz, są przegrody aktywowane termiczne. Przegrody aktywowane termicznie mogą współpracować z własnym magazynem energii lub być zasilane pompą ciepła, np. w połączeniu z panelami fotowoltaicznymi.

1.2. Uzasadnienie na podstawie danych literaturowych

Konieczność wykorzystywania energii odnawialnej w budownictwie wskazał w swojej publikacji Lichołai L. [2]. Zwrócono w niej uwagę na rosnącą liczbę ludności kuli ziemskiej, w szczególności na terenach miejskich, a co się z tym wiąże ze wzrostem zużycia energii na tym obszarze. W publikacji tej skoncentrowano się na zdolności wykorzystania energii wiatru, wody oraz słonecznej do wytworzenia energii elektrycznej. Ta ostatnia forma energii stała się podstawą rozwiązania konstrukcyjnego budynku – ściany Trombe'a (masywnej ściany zewnętrznej z oszkleniem) opisywanej również przez tego samego badacza wraz z zespołem m.in. w pracy [3]. Szansę na użycie oprócz energii promieniowania

słonecznego również gruntu pozwala inne rozwiązanie konstrukcyjne, dokładnie przegroda aktywowana termicznie.

System ogrzewania oparty na wykorzystaniu przegród aktywowanych termicznie z wbudowanymi w ich wnętrzu przewodami zaprezentowano w polskim piśmiennictwie naukowym: Krzaczek M. w [4]. Rozwiązanie polegające na zabetonowaniu wewnątrz zaizolowanej ściany zewnętrznej polipropylenowych przewodów oraz utrzymaniu w jej miejscu stałej temperatury bez względu na porę roku pomysłodawca systemu nazwał barierą termiczną. Pozostałymi komponentami układu były: kolektor słoneczny usytuowany w postaci polipropylenowych rurek pod dachówką budynku oraz system gromadzenia energii jako wymienniki ciepła rozmieszczone w różnych pod względem temperatury strefach w gruncie. Warunek niezmiennej temperatury bariery termicznej spełniono dzięki zastosowaniu własnego układu sterowania FMGS (skrót z ang. Fuzzy Mixing Gain-Scheduled) opartego na logice rozmytej. W przypadku symulacji reakcji przegrody z barierą termiczną posłużono się programem ABAQUS wykorzystującym metodę elementów skończonych. Połączenie poszczególnych części systemu-podprogramów utworzono poprzez komendy opracowane w języku programowania FORTRAN. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono korzyści wynikające z zastosowania odnawialnych źródeł energii i otrzymania z nich również niskiej temperatury zasilania. Dodatkowo dzięki zachowaniu na stałym poziomie temperatury wewnątrz przegrody bez względu na warunki zewnętrzne istnieje możliwość wykorzystania rozwiązania do modernizacji budynków.

Pewne zagadnienia zostały rozwinięte przez Krzaczka w kolejnych artykułach wraz z współautorem – Kowalczukiem: kwestia zamodelowania konstrukcji przegrody w publikacji [5], natomiast trudność sterowania całym systemem w pracy [6].

Obliczenia numeryczne, które jak już wcześniej wspomniano przeprowadzono w programie ABAQUS, dotyczyły trójwymiarowego modelu ściany zewnętrznej [5]. Przedstawiono w nich dyskretyzację przegrody do 8 węzłów oraz założenia odnośnie profilu prędkości czynnika w przewodach tworzących barierę termiczną. Jako podstawowy wniosek podano minimalną liczbę warstw przegrody w liczbie trzech: dwie sąsiadujące z powietrzem i wykonane z materiału izolacyjnego (przy czym ta od strony wewnętrznej o niskim współczynniku przewodzenia ciepła) oraz masywna warstwa konstrukcyjna z osadzonymi przewodami.

System sterowania FMGS umożliwił otrzymanie w barierze termicznej konkretnej i stałej temperatury, ewentualnie niższej od zadanej o 0,15°C bądź wyższej o 0,22°C [6]. Uzyskano czynnik o odpowiedniej temperaturze zasilania oraz przepływie masowym, mimo źródła ciepła z 3 różnych, odnośnie pola temperatury, stref w gruncie.

Słowacki badacz Dolezel przywołując koncepcję systemu z barierą termiczną przypomniał w swojej publikacji [7] istotność zasilania bariery termicznej z różnych stref w gruncie. Przedstawił 3 modyfikacje przegrody pod kątem materiałów budowlanych, jak i umieszczenia przewodów wewnątrz konstrukcji. Pierwsza ściana składała się z następujących warstw podając je od strony zewnętrznej wraz z ich grubością: tynk zewnętrzny – 10 mm; izolacja termiczna – 180 mm; żelbet 150 mm z barierą termiczną; izolacja termiczna – 60 mm oraz tynk wewnętrzny – 10 mm. W drugim przypadku rurki wbudowano w 30 mm tynk, który naniesiono na warstwę 300 mm cegły przed położeniem izolacji zewnętrznej o grubości 140 mm. Podobnie jak w poprzednim wariancie przegroda

została wykończono 10 mm tynkiem. Ostatnim typem była ściana wykonana z dwóch 15 mm płyt OSB, których przestrzeń pomiędzy nimi wypełniono izolacją termiczną o grubości 150 mm. Od strony zewnętrznej na powierzchnię jednej z płyt OSB ułożono warstwę bariery termicznej z tynkiem o grubości 30 mm. Następnie całą konstrukcję odseparowano od powietrza zewnętrznego 120 mm izolacją termiczną oraz 10 mm tynkiem zewnętrznym. Autor wyznaczył 3 rozkłady temperatur dla każdej z 3 typów konstrukcji przegród. Przeanalizowano 2 sytuacje bez bariery termicznej dla temperatury zewnętrznej równej: -15°C (obliczeniowa) oraz 2,7°C (średnia). Trzeci rozkład nakreślono dla sytuacji, gdy warstwa z barierą termiczna osiągnie wartość 14°C. We wszystkich przypadkach jako temperaturę wewnętrzną przyjęto 20°C. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że aby osiągnąć spadek strat ciepła podczas zasilania bariery termicznej czynnikiem o temperaturze 14°C temperatura zewnętrzna powinna być niższa od wartości granicznej. Dla poszczególnych wariantów wartość ta osiągnęła wartości: dla żelbetowej przegrody -2,5°C, dla konstrukcji wykonanej z cegły 6,3°C, a w przypadku z płytami OSB 9,6°C. Porównując wszystkie konstrukcje, dla ściany wykonanej z płyt OSB rozwiązanie to okazało się najkorzystniejsze, jednak należy pamiętać o większym przepływie ciepła przez tego typu ścianę.

Podobne analizy wykorzystujące rozkłady temperatur wykonał polski zespół: Leciej-Pirczewska i Szaflik odnośnie wymaganej temperatury bariery termicznej niezbędnej do spełnienia przez przegrodę określonej funkcji [8]. Przedmiotem obliczeń była ściana zewnętrzna wykonana w systemie ISOMAX. Część konstrukcyjną stanowiła warstwa BIO-POR-BETON-u z przewodami PP ułożonymi w kształt meandra w jej osi symetrii. Cała przegroda została zaizolowana z obu stron styropianem o grubości 12,5 cm. Na podstawie rozkładu temperatury dla przegrody bez bariery termicznej stwierdzono, że w zależności od lokalizacji rurek temperatura czynnika wewnątrz nich powinna być równa bądź wyższa od temperatury w tym samym miejscu dla wariantu bez bariery termicznej, jeżeli ściana z przewodami ma spełniać określone zadanie, to znaczy ograniczać straty ciepła i ewentualnie ogrzewać pomieszczenie. Spadek temperatury poniżej tej wartości spowoduje zmianę przeznaczenia ściany na cele chłodnicze. W publikacji przedstawiono również wnioski na temat wpływu temperatury zasilania na straty ciepła poszczególnych składowych otoczenia to jest: pomieszczenia, przegrody i bariery termicznej. Zauważono, że wraz ze wzrostem temperatury zasilania straty od pomieszczenia spadają, jednak następuje zwiększenie strat przegrody i bariery termicznej.

Zagadnienie związane z temperaturą średnią bariery termicznej ci sami badacze: Leciej-Pirczewska i Szaflik przedstawili w kolejnej publikacji, stanowiącej kontynuację poprzedniej [9]. Wykazano wzrost tego parametru wraz ze wzrostem temperatury wlotowej czynnika zasilającego wężownicę oraz umieszczeniem jej jak najbliżej powierzchni wewnętrznej przegrody. W kwestii wpływu pojemności cieplnej strumienia na jego temperaturę średnią potwierdzono wzrost temperatury bariery termicznej wraz z wyższą temperaturą wlotową oraz pojemnością cieplną czynnika, natomiast w publikacji z 2020 [10] zmniejszenie emisji CO_2 w budynku z barierą termiczną.

Wspomniana wcześniej koncepcja firmy ISOMAX, której pomysłodawcą jest Edmond D. Krecke, polegała na ułożeniu przewodów PP na dachu pod jego pokryciem, w warstwie konstrukcyjnej ściany zewnętrznej oraz w płycie fundamentowej, do celów chłodniczych również w strefie poza budynkiem, od 2 m do 3 m pod powierzchnią gruntu [11, 12]. Zasada działania polega na przekazaniu do magazynu energii pod budynkiem energii zgromadzonej na dachu, a następnie w sezonie grzewczym oddanie jej do konstrukcji ściany zewnętrznej. Typowa przegroda składa się z warstwy konstrukcyjnej o grubości 15 cm zbudowanej z BIO-POR-BETON-u, betonu lekkiego z wprowadzoną do mieszanki pianką BIO-POR i ułożoną przed betonowaniem wężownicą przewodów PP. Ściana zewnętrzna zostaje zaizolowana z obu stron warstwą styropianu o grubościach: po 12,5 cm bądź 10 i 15 cm. Następnie zasilana czynnikiem – wodnym roztworem glikolu, aby uzyskać temperaturę bariery termicznej w zakresie 14°C – 18°C.

Rozwiązanie komercyjne firmy ISOMAX stało się podstawą do realizacji kolejnej polskiej publikacji współautorstwa Ulbrich-a [13]. Scharakteryzowano w niej projekt ściany zewnętrznej firmy ISOMAX w zakresie strat ciepła z pomieszczenia oraz z bariery termicznej w odniesieniu do jej temperatury i lokalizacji budynku na terenie Polski. Konstrukcja ściany składała się z 2 warstw styropianu o grubości 0,125 m, pomiędzy którymi umieszczono BIO-POR-BETON o grubości 0,15 m z przewodami PP o średnicy 0,015 m. Całą konstrukcję wykończono tynkiem cementowo-wapiennym od strony wewnętrznej, a po stronie powietrza zewnętrznego tynkiem mineralnym o grubościach 0,003 m. Porównując wyniki dla przegrody z barierą termiczną oraz bez niej zaobserwowano spadek strat ciepła z pomieszczenia przy zwiększeniu się temperatury zasilania. W przypadku strat ciepła z bariery termicznej istotnym parametrem jest różnica temperatury bariery termicznej i powietrza zewnętrznego, im wyższe ΔT tym większe straty ciepła z bariery, zatem zimą na obszarze najchłodniejszym straty są największe. Dodatkowo autorzy zaproponowali modyfikację istniejącego rozwiązania polegającą na wprowadzeniu kolejnej bariery termicznej w warstwie tynku cementowego zewnętrznego. Koncepcja ta okazała się korzystna w miesiącach letnich i zaleca się włączenie jej w tym okresie, ponieważ zimą straty z dodatkowej bariery termicznej są znaczne.

Zagadnienie wykorzystania przegrody z wbudowanymi przewodami w konstrukcji budynku jednorodzinnego składającego się z 2 kondygnacji przedstawił serbski zespół badaczy Stojanovic i inni [14]. W celu przeprowadzenia symulacji wykorzystali program EnergyPlus, natomiast bryłę budynku przygotowali w programie Google SketchUp za pomocą wtyczki do programu – Open Studio. Porównali wyniki zużycia energii na cele grzewcze dla przypadku bez i z rurkami wewnątrz ściany zewnętrznej, przy zasilaniu przegrody czynnikiem o 3 temperaturach: 10°C, 14°C i 18°C. Pierwszy wariant przegrody to zaizolowana od strony zewnętrznej 5 cm warstwą styropianu ściana składająca się z pustaków o grubości 25 cm. Rozwiązanie z wbudowanymi przewodami powstało w wyniku modyfikacji wcześniejszej konstrukcji układając 2 kolejne warstwy: 15 cm betonu z elementem aktywowanym termicznie (TABS), a następnie izolację zewnętrzną – styropian o grubości 15 cm. Ściana została wykończona warstwą tynku jak autor przedstawił na schemacie przegrody, a temperaturę wewnętrzną założono 20°C. Na podstawie obliczeń

stwierdzono spadek zużycia energii dla przypadków z elementem TABS, największy na poziomie 74,6% w sytuacji temperatury zasilania równej 18°C. Dla tego wariantu przeprowadzono również analizę ekonomiczną, wyznaczając wskaźnik SPBT równy 6 lat.

Dwaj badacze ze Słowacji i Czech: Krajcik i Sikula [15] przeprowadzili badania pod kątem wykorzystania do celów chłodniczych 4 różnych konfiguracji osadzenia przewodów w konstrukcji ściany. Rozwiązania konstrukcyjne utworzono w identycznej przegrodzie pod względem grubości i użytych materiałów jak: tynk zewnętrzny o grubości 1 cm, wełna mineralna o grubości 20 cm, beton 25 cm i tynk wewnętrzny o grubości 1 cm przesuwając jedynie przewody PE-Xa/Al/PE o wymiarach 20 x 2,9 mm od strony zewnętrznej w kierunku powietrza wewnętrznego. W ten sposób utworzono nadmienione już 4 typy ścian. W pierwszym z nich rurki umieszczono w warstwie tynku o grubości 2 cm (wprowadzonego dodatkowo jedynie dla tego jednego typu) pomiędzy warstwą izolacyjną a konstrukcyjną. Następna modyfikacja to zabetonowanie przewodów w warstwie konstrukcyjnej ściany. Kolejna opcja to przeniesienie rurek do wewnętrznej warstwy wykończeniowej zwiększając jej grubości do 3 cm. Ostatni wariant wykonano pozostawiając nadal przewody w tynku wewnętrznym, ale oddzielając go od pozostałych warstw ściany materiałem izolacyjnym (polistyrenem) o grubości 3 cm. Na podstawie wyników otrzymanych za pomocą programu autorstwa Sikuli CalA 3.0 [16] wyciągnięto podstawowe wnioski na temat wrażliwości poszczególnych rodzajów przegrody na wprowadzane zmiany, stąd dla rozwiązań z przewodami umieszczonymi w tynku wewnętrznym istotny wpływ na moc na cele chłodnicze ma rozstaw rurek. Dla pozostałych 2 typów ścian, gdzie przewody znajdują się w warstwie betonu bądź z nim sąsiadują od strony izolacji zewnętrznej i jednocześnie znajdują się w warstwie tynku, wówczas kluczowym aspektem jest grubość izolacji.

W publikacji z 2021 autorzy: Krajcik, Arici, Sikula i Simko [17] wytypowali możliwość dalszych badań rozwiązania z wbudowanymi przewodami w procesie grzania i chłodzenia oraz w modernizacji budynków, natomiast w publikacji chińskich badaczy: Yang, Chen i inni [18] zwrócono uwagę na potrzebę kolejnych analiz pod kątem komfortu cieplnego.

W swojej pracy chińscy badacze: Xie, Zhu oraz Xu przeanalizowali zastosowanie przewodów wewnątrz konstrukcji przegrody w sposób teoretyczny wykorzystując program Fluent [19]. Autorzy ulepszyli narzędzie wykorzystywane do obliczeń numerycznych o wprowadzenie okresowych temperaturowych warunków brzegowych. Modyfikację ściany sprawdzono pod względem przepływu ciepła oraz temperatury powierzchni wewnętrznej odnosząc otrzymane rezultaty do przegrody bez rurek. Stwierdzono dzięki temu pozytywne oddziaływanie takich rurek na zmniejszenie obciążenia chłodniczego. Dla przegrody z przewodami strumień ciepła wyniósł -0,26 MJ/m^2 w ciągu dnia, a bez rurek 2,1 MJ/m^2 na dobę (wartość dodatnia świadczy o zwiększeniu obciążenia chłodniczego). W kwestii różnicy temperatur między powietrzem, a powierzchnią wewnętrzną przegrody zmiana poprzez dodanie do niej rurek wpłynęła pozytywnie. Dla takiego przypadku osiągnęła średnią wartość 0,72°C, gdy dla opcji bez ulepszeń była równa 2,93°C. Dodatkowo dla wariantu z rozstawem przewodów równym 200 mm przeprowadzono obliczenia przepływu ciepła powierzchni wewnętrznej dla temperatur zasilania: 19°C, 20°C, 21°C, 22°C oraz 23°C.

Następnie odwrócono poprzednią analizę o określenie wpływu rozstawu przewodów na ten sam strumień ciepła przy stałej temperaturze zasilania równej 21°C. W obu przypadkach zmniejszenie temperatury zasilania i rozstawu powoduje spadek przepływu ciepła od strony wewnętrznej odpowiednio o 2,6 W/m^2 na każdy 1°C oraz 2,3 W/m^2 co 50 mm.

Kolejni naukowcy z Chin: Shen i Li przeanalizowali przegrodę z wbudowanymi przewodami, zasilanymi czynnikiem przygotowanym w pompie ciepła typu powietrze/woda [20]. Do obliczeń posłużono się ponownie programem Fluent. Przestudiowano 6 miejscowości w Chinach: Beijing (Pekin), Shenyang, Harbin, Zhengzhou, Shanghai oraz Guangzhou różniących się pod względem strefy klimatycznej, wymagania dotyczącego współczynnika przenikania ciepła oraz miesięcy przypadających na okres grzewczy. Dodatkowo dla miasta Pekin rozważono temperatury zasilania rurek w zakresie 16°C – 26°C co 2°C oraz wszystkie 4 kierunki ustawienia ściany z rurkami względem stron świata. W przypadku pozostałych miejscowości obliczenia zawężono do temperatury zasilania równej temperaturze wewnętrznej w pomieszczeniu, czyli 20°C oraz kierunku północnego. Dzięki przygotowaniu różnych opcji udało się ocenić rozwiązanie w 3 zagadnieniach: położenia, ukierunkowania przegrody z rurkami oraz jej temperatury zasilania odnosząc wyniki do wersji bez przewodów. W kwestii lokalizacji to wykorzystanie rozwiązania do celów grzewczych sprawdza się w każdych warunkach klimatycznych, spadek obciążenia cieplnego zanotowano w przedziale 78% – 84%, przy czym największe korzyści można zauważyć na terenach najzimniejszych. Bez względu na ukierunkowanie przegrody względem stron świata zastosowanie rurek przynosi pożytek w postaci ograniczenia energii pierwotnej co najmniej o 42,4%, przy czym kierunek północny wskazuje największe zyski, czyli spadek na poziomie 44%. Co do temperatury zasilania, którą scharakteryzowano dla jednego wariantu tj. Pekinu z kierunkiem północnym, stwierdzono, że najkorzystniejszą temperaturą zasilania będzie 20°C. Dla takiego też wariantu wykazano, że w sytuacji wbudowanych rurek, temperatura na wewnętrznej powierzchni przegrody prawie osiąga wartość temperatury wewnętrznej, gdy w wariancie bez rurek jest niższa w granicach od 1°C do 2°C. Analizy rozszerzono również o kwestie ekonomiczne dla tego samego wariantu. W tym celu obliczono wskaźnik PP (okres zwrotu), który wyniósł 2 lata.

Ci sami naukowcy: Shen i Li wraz z Yan [21] zaproponowali kolejne zastosowanie wbudowanych rurek, tym razem w podwójnej fasadzie. Przewody umieszczono w elemencie zacieniającym, a dzięki połączeniu ich z gruntowym wymiennikiem ciepła uzyskano spadek obciążenia cieplnego na poziomie 18,4%.

Następne połączenie gruntu tym razem z przewodami umieszczonymi w podłodze i stropie przedstawił w swojej pracy wraz z zespołem wspomniany Xu [22]. Autorzy wskazali korzystny wpływ takiego rozwiązania w systemie klimatyzacji pomieszczeń. Podobnie kolejni naukowcy z Chin: Qu i inni [23] również poruszyli kwestię chłodzenia, a dokładniej kontroli temperatury zasilania ściany zewnętrznej.

Kolejne zastosowanie wbudowanych przewodów w budownictwie przedstawili badacze z Hiszpanii: Romani, de Gracia i Perez w pracy na temat TABS [24]. Jako główne systemy wykorzystujące element aktywowany termicznie autorzy wymienili: radiacyjne podłogi

i sufity, kanałowe płyty stropowe, płyty betonowe oraz obudowę budynku. Autorzy wskazali również modele takie jak: numeryczne, analityczne, półanalityczne oraz RC służące do symulacji zachowania systemów TABS.

Przedstawiciele ośrodków naukowych ze Stanów Zjednoczonych, Chin oraz Tajlandii: Yu i inni [25] w badaniach posłużyli się modelem RC do opisu wymiany ciepła przez przegrodę, polegającym na opisaniu poszczególnych warstw przegrody oporami (R) oraz pojemnościami (C). Elementem analizowanym była ściana z warstwą składająca się z rurek kapilarnych o średnicy 4,3 mm i rozstawie 8 mm rozmieszczonych na płaszczyźnie o wymiarach 1 m x 1m. Panel ten został umieszczony w zaprawie o grubości 10 mm między dwiema warstwami cegły betonowej po 120 mm każda, gdzie jedna z nich od strony wewnętrznej została otynkowana 10 mm warstwą. Rozwiązanie to porównano z tradycyjną przegrodą bez ulepszeń wyciągając wnioski dotyczące czynnika zasilającego rurki, a dokładniej jego temperatury zasilania i strumienia masy, dodatkowo również przeprowadzono analizę energetyczną rozwiązania. Obliczenia przeprowadzono dla różnych wartości temperatury zasilania z przedziału 18°C, 20°C, 22°C, i 24°C przy stałym przepływie równym 0,00225 kg/s oraz w sytuacji odwrotnej to znaczy dla temperatury 24°C i dla przepływów: 0,00075 kg/s, 0,0015 kg/s, 0,00225 kg/s oraz 0,003 kg/s podczas sezonu chłodniczego. Podczas zasilania układu zauważono spadek temperatury na powierzchni wewnętrznej przegrody, a w sytuacji, gdy temperatura zasilania jest niższa od temperatury w pomieszczeniu potencjał do zmniejszenia obciążenia chłodniczego. W czasie stałej temperatury zasilania równej 24°C i zmiennego przepływu zauważono, że wzrost strumienia masy od określonej wartości znacząco nie zmienia temperatury na powierzchni ściany, natomiast może się przyczynić do zwiększenia zużycia energii niezbędnej do wymuszenia krążenia wody. Pod względem energetycznym obniżenie temperatury zasilania powoduje spadek obciążenia chłodniczego, dla 18°C jest to wartość -22,4 W/m^2. Zmiana przepływu nie powoduje już znacznych zmian w obciążeniu chłodniczym, dla temperatury zasilania 24°C są to wartości w granicach od 0,40 W/m^2 dla strumienia masy równego 0,00075 kg/s do 0,21 W/m^2 przy 0,003 kg/s.

Zagadnieniem wyboru lokalizacji warstwy z rurkami kapilarnymi zajęli się ci sami badacze ze Stanów Zjednoczonych: Niu oraz Yu przedstawiając swoje wyniki w kolejnej publikacji [26]. Oceniono dwie typy przegrody. Pierwsza o identycznej konstrukcji jak w artykule [25] posłużyła do oceny pod kątem temperatury na powierzchni wewnętrznej ściany oraz spadku temperatur w pętli rurek kapilarnych w zależności od ich lokalizacji. W tym celu wybrano 3 miejsca na osadzenie takiej warstwy: strona zewnętrzna, oś przegrody oraz powierzchnia wewnętrzna. Obliczenia przeprowadzono dla temperatur zasilania ponownie dla tego samego zakresu od 18°C do 24°C dla temperatury wewnętrznej równej 24°C. Z przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że najbardziej zbliżoną temperaturę na powierzchni wewnętrznej przegrody do temperatury zasilania uda się osiągnąć, gdy rurki kapilarne zlokalizowane są w warstwie wewnętrznej, dzięki oddzieleniu tej warstwy od warunków zewnętrznych. Efekt ten można również zauważyć przy różnicy temperatur na zasilaniu i powrocie z pętli rurek kapilarnych. Dla wariantu od strony wewnętrznej spadek ten wynosi około 0,08°C dla temperatury zasilania 18°C, natomiast dla powierzchni zewnętrznej wynosi wówczas 0,26°C. Drugim analizowanym wariantem była betonowa ściana o grubości 240 mm, z 40 mm izolacją od strony zewnętrznej oraz wykończoną z obu

stron tynkiem o grubości 10 mm. Dla tego typu przegrody omówiono zagadnienie najkorzystniejszej lokalizacji panelu z rurek kapilarnych w okresie zimy oraz lata. Okazało się, że w sezonie grzewczym najlepiej umieścić ją w warstwie betonu od stronu izolacji jak najbliżej powietrza zewnętrznego, wówczas dla temperatury zewnętrznej równej -15°C szacuje się zyski ciepła na poziomie 11 W/m^2. Zauważono jednocześnie ich tendencję wzrostową związaną z obniżaniem się temperatury zewnętrznej, w ten sposób dla -36°C zanotowano wartość 25 W/m^2. Latem natomiast warstwa z rurkami kapilarnymi powinna znaleźć się pod tynkiem wewnętrznym. W takiej sytuacji maksymalną wartość, pod względem zmniejszenia obciążenia chłodniczego, można zaobserwować dla najwyższej analizowanej temperatury 36°C i było to 39 W/m^2. Gdy temperatura w sezonie chłodniczym zacznie spadać, wtedy zmniejszą się również korzyści i tak dla 22°C będzie to 31 W/m^2.

Kolejny zespół słowackich badaczy: Kalus i inni [27] przeprowadzili analizę energetyczną dla budynku bez oraz z aktywną izolacją termiczną. Pojęciem aktywnej izolacji termicznej (rozwinięcie skrótu ATI) nazwano opatentowane rozwiązanie współautorstwa Kalusa-a [28] polegające na wbudowania przewodów w warstwie izolacji. W artykule koncepcję tą wykorzystano do zaizolowania wszystkich przegród zewnętrznych przykładowego 2-kondygnacyjnego budynku jednorodzinnego. Porównując obciążenia cieplne wyznaczone zgodnie z normą STN EN 12831-1 dla temperatur: zewnętrznej równej -11°C oraz w pomieszczaniu wynoszącej 20°C dla 2 wariantów budynku: bez oraz z aktywną izolacją zauważono spadek o około 14% (6,7 kW/7,8 kW) dla temperatury zasilania pętli przewodów równej 26°C. Rozdzielając jednak strumień przepływu ciepła na dwie składowe, czyli w stronę powietrza zewnętrznego oraz do wnętrza pomieszczenia zauważono łącznie dla wszystkich przegród z elementem grzewczym o temperaturze 26°C moc na cele grzewcze możliwą do przekazania pomieszczeniu na poziomie 6,8 kW. W tradycyjnych konstrukcjach wartość ta wynosi 0 kW. Autorzy wskazali również potencjał rozwiązania pod kątem wykorzystania odnawialnych źródeł energii oraz wykorzystania do celów termomodernizacyjnych, dzięki umieszczeniu rurek w płytach izolacyjnych.

Ci sami naukowcy Kalus i inni w kolejnej publikacji [29] opisali 2 rozwiązania stosowane w konstrukcji ściany w celach grzewczych bądź chłodniczych. Pierwszym przypadkiem było ogrzewania płaszczyznowe ścienne w postaci przewodów umieszczonych w warstwie tynku wewnętrznego. Zastosowanie warstwy z elementem aktywowanym termicznie – opatentowanej przez autorów [30] i nazywanej w skrócie z języka angielskiego ITAP panel, czyli interior thermally active panel stanowiło drugą koncepcję. Obliczenia wykonano dla 2 typów przegród: ściany zewnętrznej oraz wewnętrznej. Temperaturę po obu stronach przegrody, czyli w pomieszczeniu i na zewnątrz, przyjęto w zależności od pory roku, czyli dla ściany zewnętrznej odpowiednio 20°C i -11°C, a po drugiej stronie ściany wewnętrznej 18°C w okresie zimowym, podczas lata natomiast temperaturę wewnątrz budynku założono 26°C, a otoczenia 32°C. Pod względem konstrukcyjnym obliczenia wykonano dla rozstawu 100 mm i średnicy 15 mm, grubość warstwy z elementem płyty ITAP równa 50 mm, a zasilanie czynnikiem o temperaturze 35°C dla funkcji grzania i 17°C dla chłodzenia. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że w przypadku ściany zewnętrznej bez względu na wprowadzenie dodatkowych elementów do przegrody przepływy ciepła przez nią są do siebie zbliżone w obu sezonach: grzewczych i chłodniczych. Sytuacja

zmienia się na korzyść płyt ITAP przy ich montażu w ścianie wewnętrznej, wówczas przepływ ciepła zmienia się mniej więcej o 15% podczas grzania (w kontekście przekazania ciepła do pomieszczenia), a w czasie chłodzenia o 8% pod kątem odbioru z niego. Kolejna część analiz dotyczyła określenia wpływu temperatury wody oraz temperatury wewnątrz pomieszczenia na przepływ ciepła oraz temperaturę na powierzchni przegrody. Czynniki te są bardzo istotne, mogą spowodować prawie 10-krotny wzrost oddawania ciepła do pomieszczenia dla temperatury wewnętrznej 24°C oraz temperatury zasilania równej 40°C w porównaniu z temperaturą zasilania 25°C w sezonie grzewczym. W przypadku okresu chłodniczego obniżenie temperatury wody zwiększa strumień ciepła odbierany z pomieszczenia.

W kolejnych 4 publikacjach autorstwa Kalus i inni [31], [32], [33], [34] kontynuowano analizę przewodów wbudowanych w konstrukcję. Pod względem ekonomicznym wskazano potencjał takiego rozwiązania w ścianie dzięki zmniejszeniu grubości izolacji cieplnej, natomiast stosując takie elementy w dachu zwrócono uwagę na jego pokrycie i ukierunkowanie.

Wspomniani wcześniej naukowcy z Chin: Yang, i Chen [35] w publikacji z 2022 roku przedstawili podział izolacji na statyczną – STIs (skrót z ang. static thermal insulation solutions) i dynamiczną – DTIs (skrót z ang. dynamic thermal insulation solutions). Dla pierwszego typu kluczowy jest opór cieplny warstwy wykonanej z takiego materiału, natomiast dla drugiego typu należy uwzględnić różnicę temperatury poszczególnych warstw przegrody. Jako możliwość dalszego rozwoju autorzy wskazali zagadnienia związane z DTIs. Kwestia dopasowującej się izolacji została poruszona również w publikacji z 2019 przez badaczy z Wielkiej Brytanii: Cui i Overend [36] oraz w 2022 roku przez chińskich naukowców: Wu z zespołem [37].

1.3. Uzasadnienie na podstawie obliczeń

W celu dodatkowego uzasadnienia podjęcia tematu wykonano analizę rozkładu temperatury dla przegrody bez oraz z elementem aktywowanym termicznie. Wykorzystano zależności przedstawione w tablicy (Tablica 1.1) i na ich podstawie wyznaczono współczynnik przenikania ciepła oraz gęstość strumienia ciepła dla przegrody oraz po jej stronie wewnętrznej i zewnętrznej dla 5 wartości temperatury zewnętrznej: -20°C, -10°C, 0°C, 10°C i 20°C. Wyniki zebrano w kolejnej tablicy (Tablica 1.2) oraz na poniższym rysunku (Rys. 1.1) dla 5 wariantów: bez elementu aktywowanego termicznie oraz 4 wartości temperatury zasilania: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C. Na ich podstawie zauważono wzrost gęstości strumienia po stronie zewnętrznej wraz ze wzrostem temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie z jednoczesnym spadkiem gęstości strumienia ciepła po stronie wewnętrznej. Dla przypadku 20°C gęstość strumienia ciepła po stronie wewnętrznej zmniejszyła się do poziomu 0 W/m^2 z powodu przyjęcia temperatury wewnętrznej równej 20°C, a dla temperatury zasilania 22°C osiągnęła wartości ujemne, czyli nastąpiła zmiana kierunku strumienia ciepła „z" „do" pomieszczenia.

Tablica 1.1. Zależności do wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła i gęstości strumienia ciepła dla przegrody oraz po jej stronie wewnętrznej i zewnętrznej

Wskaźnik / Jednostka / Element	Współczynnik przenikania ciepła [W/(m^2·K)]	Gęstość strumienia ciepła [W/m^2]
Przegroda	$U = \frac{1}{\left(R_{si} + \sum_{j=1}^{n} \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{se}\right)}$	$\dot{q} = U \cdot (T_i - T_e)$
Strona wewnętrzna	$U_{wew} = \frac{1}{\left(R_{si} + \sum_{j=1}^{n} \frac{d_j}{\lambda_j}\right)}$	$\dot{q}_{wew} = U_{wew} \cdot (T_i - T_n)$
Strona zewnętrzna	$U_{zew} = \frac{1}{\left(\sum_{j=1}^{n} \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{se}\right)}$	$\dot{q}_{zew} = U_{zew} \cdot (T_n - T_e)$

OBJAŚNIENIA OZNACZEŃ W TABLICY:

d_j – grubość warstwy materiału j, [m]; d_b – betonu 0,15 m/2 = 0,075 m, d_s – styropianu 0,13 m,

R_{se} – opór przejmowania ciepła na zewnętrznej stronie przegrody, [m^2·K/W]; przyjęto 0,04 m^2·K/W,

R_{si} – opór przejmowania ciepła na wewnętrznej stronie przegrody, [m^2·K/W]; przyjęto 0,13 m^2·K/W,

T_e – temperatura zewnętrzna, [K],

T_i – temperatura wewnętrzna, [K]; przyjęto 20°C,

T_n – temperatura na powierzchni pętli, [K],

λ_j – współczynnik przewodzenia ciepła materiału j, [W/(m·K)]; λ_b – betonu 2,24 W/(m·K), λ_s – styropianu 0,031 W/(m·K).

Tablica 1.2. Wartości współczynnika przenikania ciepła i gęstości strumienia ciepła dla przegrody oraz po jej stronie wewnętrznej i zewnętrznej dla wariantów: bez elementu aktywowanego termicznie oraz wartości temperatury zasilania: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C

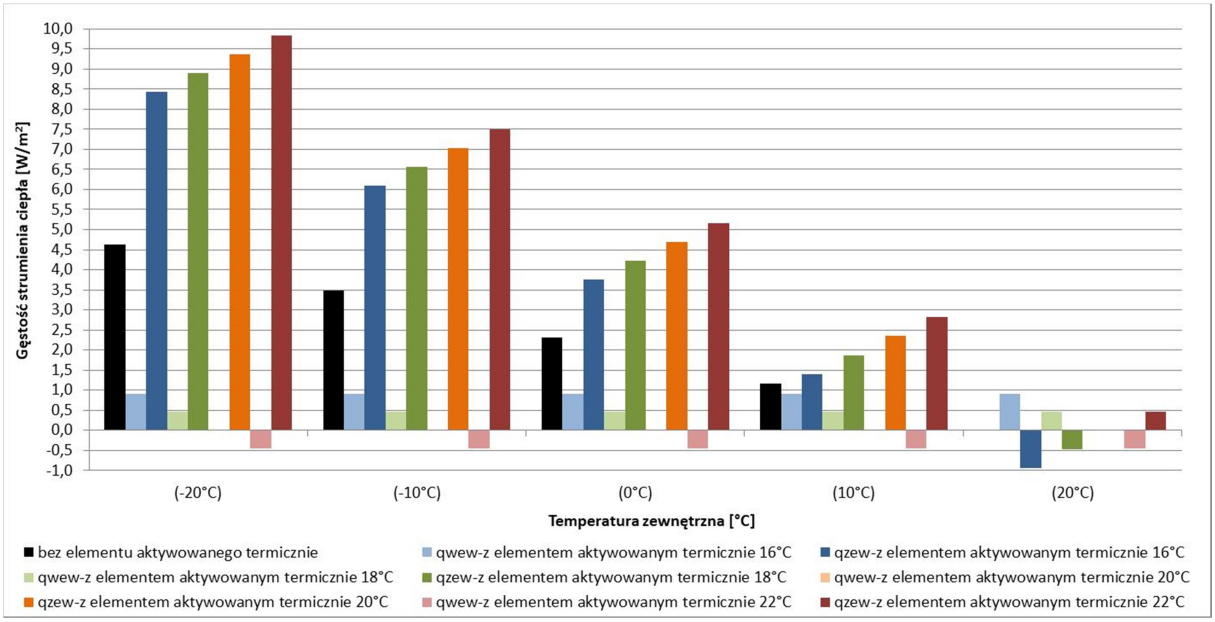
Wskaźnik / Jednostka / Typ przegrody Temperatura zasilania (Temperatura zewnętrzna)	U W/(m^2·K)	q W/m^2	U_{wew} W/(m^2·K)	q_{wew} W/m^2	U_{zew} W/(m^2·K)	q_{zew} W/m^2
bez elementu aktywowanego termicznie (-20°C)	0,116	4,638				
bez elementu aktywowanego termicznie (-10°C)	0,116	3,479				
bez elementu aktywowanego termicznie (0°C)	0,116	2,319				

Tablica 1.2. c.d. Wartości współczynnika przenikania ciepła i gęstości strumienia ciepła dla przegrody oraz po jej stronie wewnętrznej i zewnętrznej dla wariantów: bez elementu aktywowanego termicznie oraz wartości temperatury zasilania: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C

Wskaźnik / Jednostka / Typ przegrody / Temperatura zasilania (Temperatura zewnętrzna)	U	q	U_{wew}	q_{wew}	U_{zew}	q_{zew}
	$W/(m^2 \cdot K)$	W/m^2	$W/(m^2 \cdot K)$	W/m^2	$W/(m^2 \cdot K)$	W/m^2
bez elementu aktywowanego termicznie (10°C)	0,116	1,160				
bez elementu aktywowanego termicznie (20°C)	0,116	0,000				
z elementem aktywowanym termicznie 16°C (-20°C)			0,230	0,918	0,234	8,437
z elementem aktywowanym termicznie 16°C (-10°C)			0,230	0,918	0,234	6,093
z elementem aktywowanym termicznie 16°C (0°C)			0,230	0,918	0,234	3,750
z elementem aktywowanym termicznie 16°C (10°C)			0,230	0,918	0,234	1,406
z elementem aktywowanym termicznie 16°C (20°C)			0,230	0,918	0,234	-0,937
z elementem aktywowanym termicznie 18°C (-20°C)			0,230	0,459	0,234	8,905
z elementem aktywowanym termicznie 18°C (-10°C)			0,230	0,459	0,234	6,562
z elementem aktywowanym termicznie 18°C (0°C)			0,230	0,459	0,234	4,218
z elementem aktywowanym termicznie 18°C (10°C)			0,230	0,459	0,234	1,875
z elementem aktywowanym termicznie 18°C (20°C)			0,230	0,459	0,234	-0,469
z elementem aktywowanym termicznie 20°C (-20°C)			0,230	0,000	0,234	9,374

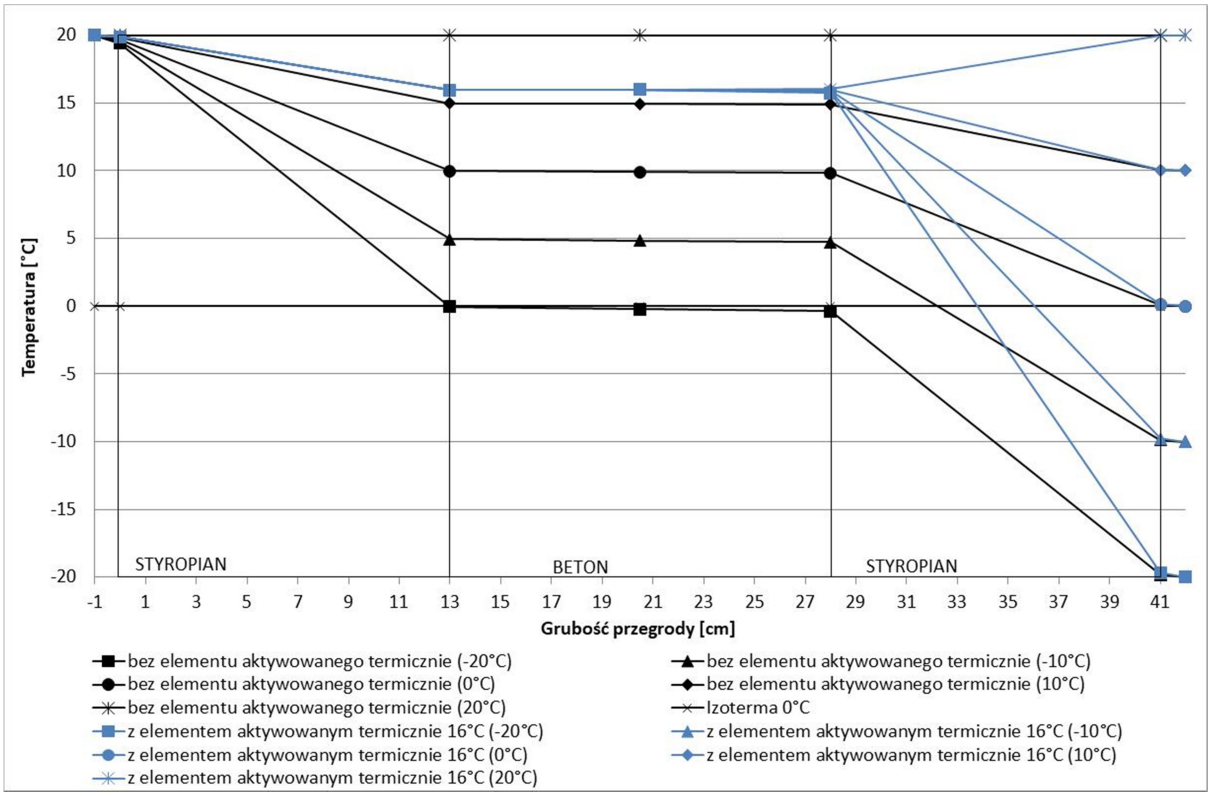
Tablica 1.2. c.d. Wartości współczynnika przenikania ciepła i gęstości strumienia ciepła dla przegrody oraz po jej stronie wewnętrznej i zewnętrznej dla wariantów: bez elementu aktywowanego termicznie oraz wartości temperatury zasilania: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C

Wskaźnik / Jednostka / Typ przegrody / Temperatura zasilania (Temperatura zewnętrzna)	U	q	U_{wew}	q_{wew}	U_{zew}	q_{zew}
	$W/(m^2 \cdot K)$	W/m^2	$W/(m^2 \cdot K)$	W/m^2	$W/(m^2 \cdot K)$	W/m^2
z elementem aktywowanym termicznie 20°C (-10°C)			0,230	0,000	0,234	7,031
z elementem aktywowanym termicznie 20°C (0°C)			0,230	0,000	0,234	4,687
z elementem aktywowanym termicznie 20°C (10°C)			0,230	0,000	0,234	2,344
z elementem aktywowanym termicznie 20°C (20°C)			0,230	0,000	0,234	0,000
z elementem aktywowanym termicznie 22°C (-20°C)			0,230	-0,459	0,234	9,843
z elementem aktywowanym termicznie 22°C (-10°C)			0,230	-0,459	0,234	7,499
z elementem aktywowanym termicznie 22°C (0°C)			0,230	-0,459	0,234	5,156
z elementem aktywowanym termicznie 22°C (10°C)			0,230	-0,459	0,234	2,812
z elementem aktywowanym termicznie 22°C (20°C)			0,230	-0,459	0,234	0,469

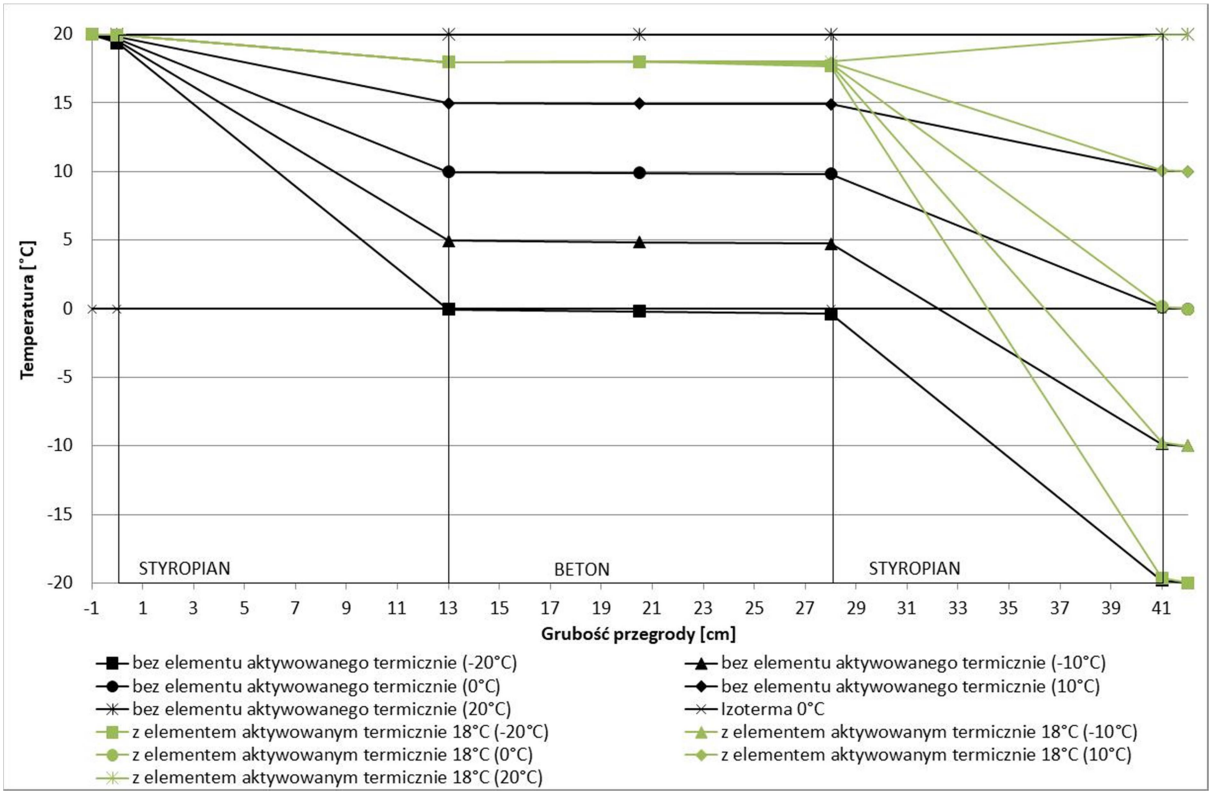


Rys. 1.1. Wartości gęstości strumienia ciepła dla przegrody oraz po jej stronie wewnętrznej i zewnętrznej dla wariantów: bez elementu aktywowanego termicznie oraz wartości temperatury zasilania: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C

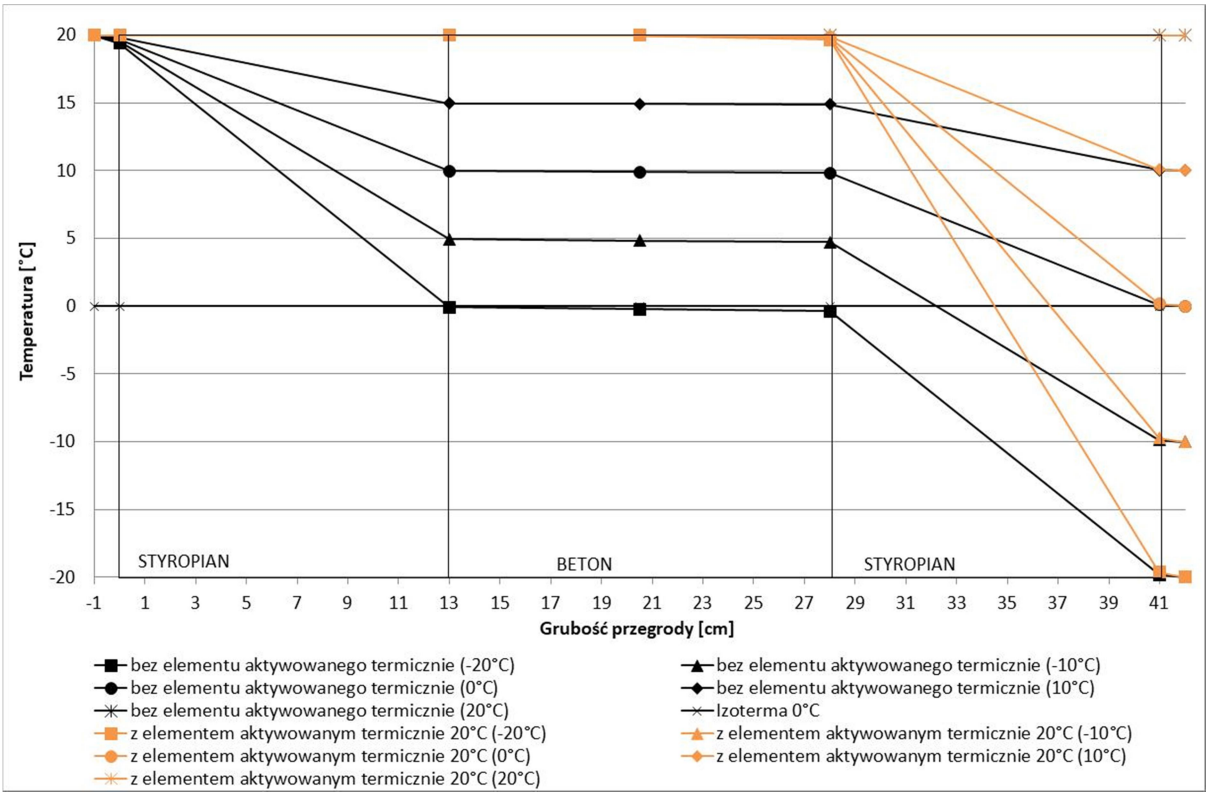
Sporządzono również rozkład temperatury dla poszczególnych 4 przypadków temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C wraz z nakreśleniem wariantu bez elementu aktywowanego termicznie (Rys. 1.2 – Rys. 1.5). W każdym przypadku temperatura wewnątrz przegrody (w osi warstwy betonu) jest wyższa od opcji bez elementu aktywowanego termicznie dla temperatury zewnętrznej od -20°C do 10°C. Modyfikacja przegrody z temperaturą zasilania równą 20°C oraz 22°C spowodowała, że dla temperatury zewnętrznej równej 20°C temperatura wewnątrz przegrody jest odpowiednio równa oraz wyższa od wariantu bez elementu aktywowanego termicznie.



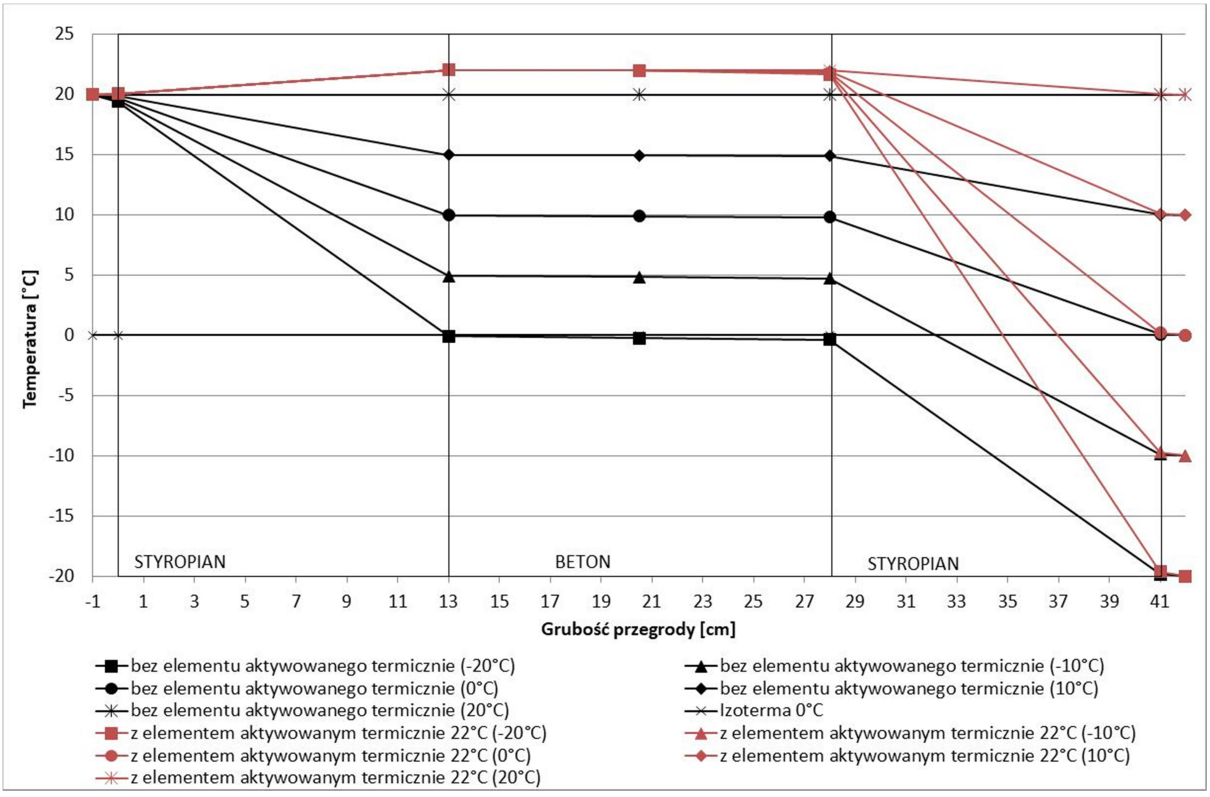
Rys. 1.2. Rozkład temperatury dla przegrody bez oraz z elementem aktywowanym termicznie dla temperatury zasilania równej 16°C oraz temperatury zewnętrznej: -20°C, -10°C, 0°C, 10°C i 20°C



Rys. 1.3. Rozkład temperatury dla przegrody bez oraz z elementem aktywowanym termicznie dla temperatury zasilania równej 18°C oraz temperatury zewnętrznej: -20°C, -10°C, 0°C, 10°C i 20°C



Rys. 1.4. Rozkład temperatury dla przegrody bez oraz z elementem aktywowanym termicznie dla temperatury zasilania równej 20°C oraz temperatury zewnętrznej: -20°C, -10°C, 0°C, 10°C i 20°C



Rys. 1.5. Rozkład temperatury dla przegrody bez oraz z elementem aktywowanym termicznie dla temperatury zasilania równej 22°C oraz temperatury zewnętrznej: -20°C, -10°C, 0°C, 10°C i 20°C

2. Podstawowe tezy pracy, jej cel i zakres

Podstawową tezą pracy jest stwierdzenie, że przegroda aktywowana termicznie w postaci ściany zewnętrznej zmniejsza zużycie energii przy jednoczesnym zapewnieniu komfortu cieplnego oraz jest elementem wspomagającym system grzewczy lub chłodniczy.

Celem pracy jest sprawdzenie parametrów przegrody aktywowanej termicznie – ściany zewnętrznej dla których nastąpi zmniejszenie zużycia energii przy jednoczesnym zapewnieniu komfortu cieplnego. Wykazanie (ustalenie), jakie powinny być rozwiązania przegród aktywowanych termicznie oraz wskazanie, czy to rozwiązanie zależy od czynników budowlanych i instalacyjnych, czy elementy budowlane (ich grubości – materiałów konstrukcyjnych i izolacyjnych) wpływają i w jakim stopniu na zużycie energii, czy ważniejszym elementem jest właściwe dobranie elementów instalacyjnych, umożliwia zasilanie przegrody aktywowanej termicznie z rozwiązań indywidualnych źródeł energii niepowiązanych z centralnymi systemami zaopatrzenia w paliwo, energię elektryczną lub ciepło.

W części teoretycznej pracy przeanalizowano 4 warianty temperatury zasilania: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C, a dla każdego z nich przestudiowano 5 grubości warstwy betonu: 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm, 7 grubości warstwy styropianu: 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm oraz 6 wartości współczynnika przewodzenia ciepła styropianu równych: 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K). Tym samym przebadano opory cieplne warstwy konstrukcyjnej wykonanej z betonu równe: 0,04 m^2·K/W, 0,07 m^2·K/W, 0,09 m^2·K/W, 0,11 m^2·K/W i 0,13 m^2·K/W oraz opory cieplne warstwy izolacyjnej wynoszące 2,58 m^2·K/W, 2,60 m^2·K/W, 2,89 m^2·K/W, 3,23 m^2·K/W, 3,25 m^2·K/W, 3,55 m^2·K/W, 3,71 m^2·K/W, 3,87 m^2·K/W, 4,19 m^2·K/W, 4,33 m^2·K/W, 4,52 m^2·K/W i 4,84 m^2·K/W.

Zakres pracy obejmuje:

- przegląd i analiza dotychczasowego stanu wiedzy w tematyce rozprawy,
- opracowanie modelu numerycznego przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) i wykonanie obliczeń dla jej różnych wariantów,
- wykonanie stanowiska eksperymentalnego i przeprowadzenie pomiarów,
- omówienie zarejestrowanych zmierzonych wielkości,
- porównanie modelu numerycznego z badaniami doświadczalnymi,
- symulacje stanów eksploatacyjnych systemu opartego na ścianie zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie w programie TRNSYS,
- analiza wyników symulacji.

3. Aktualny stan badań na temat przegród aktywowanych termicznie

3.1. Wyniki modelowania i pomiarów eksperymentalnych w obiektach i komorach klimatycznych

Wspomniani wcześniej Krajcik i Sikula wraz z trojgiem kolejnych przedstawicieli ośrodków naukowych ze Słowacji i Czech: M.Simko, P.Simko oraz Kalus-em wykonali modelowanie panelu izolacyjnego z rurkami osadzonymi w materiale przewodzącym ciepło w kanałach w izolacji termicznej [38]. W tym celu posłużono się przytoczonym już programem CalA 3.0 [16] dla układu dwuwymiarowego panelu spełniającego 2 funkcje: grzewczą i bariery termicznej. Oba te zadania są możliwe do osiągnięcia dzięki zmiennej temperaturze czynnika grzewczego w przewodach pozwalającej pokryć zapotrzebowanie na ciepło bądź jedynie ograniczyć straty ciepła z pomieszczenia. Dodatkową korzyścią jest możliwość wykorzystania takiego panelu do modernizacji budynków, przy czym dla budynków nowych autorzy polecają rozwiązanie polegające na umieszczeniu rurek w warstwie konstrukcyjnej ściany bądź w warstwie wykończeniowej od strony wewnętrznej. Wynika to z wniosku wyciągniętego przez badaczy na podstawie wyników symulacji dla 3 przypadków ułożenia przewodów w rozstawie 150 mm w ścianie o grubości 400 mm (grubość betonu i izolacji identyczna po 200 mm). Grubość warstwy wykończeniowej powierzchni wewnętrznej – tynku zależna była od umiejscowienia rurek. W ten sposób dla koncepcji z przewodami w warstwie izolacyjnej oraz konstrukcyjnej grubość tynku wyniosła 10 mm, natomiast dla 3 przypadku ta grubość została zwiększona do 30 mm ze względu na zamontowanie w nim rurek o średnicy 20 mm. Dzięki ułożeniu rurek w rdzeniu nośnym konstrukcji lub od strony wewnętrznej pomieszczenia zmniejsza się strumień ciepła do otoczenia zewnętrznego kosztem zwiększenia się przekazania go do pomieszczenia.

Dodatkowo analizy teoretyczne zostały rozszerzone o prace eksperymentalne nad panelem o wymiarach 1140 mm x 1360 mm z przewodami wykonanymi z materiału PE-Xa/Al/PE o wymiarach 20 x 2,9 mm i zamontowanymi w kanałach, które zostały utworzone w styropianie opatentowaną metodą współautorstwa Kalus-a [39]. Następnie panel ten został przymocowany do betonowej ściany o grubości 100 mm. W celu zasymulowania warunków zewnętrznych i wewnętrznych wykorzystano dwie komory klimatyczne sąsiadujące z badanym obiektem. Na podstawie eksperymentu osiągnięto stałą czasową ściany wynoszącą około 4 godzin, czyli wartość zawierającą się w zakresie 2,5 do 8 godzin podawaną w referacie współautorstwa Ning-a [40] dla rurek wbudowanych w warstwie konstrukcyjnej ściany. Dodatkowo wykonanym badaniem dla przewodów w panelu izolacyjnym potwierdzono ograniczenie strat ciepła na zewnątrz o około 50% w stosunku do konstrukcji bez bariery termicznej.

Kolejny eksperyment dotyczy pomiarów uzyskanych z budynku rzeczywistego zlokalizowanego na Węgrzech z aktywną termiczną izolacją nazwaną tak przez pomysłodawcę systemu Barkanyi i opisanego w 2 patentach: jego autorstwa [41] i współautorstwa [42]. Rozwiązanie przedstawione w polsko-węgierskim artykule autorstwa

Kisilewicz i inni [43] oraz wspomniane w publikacji z 2022 roku [44] polega na ułożeniu przewodów tworzywowych w jednej z dwóch warstw konstrukcyjnych ściany zewnętrznej, oddzielonych od siebie jak i od powietrza zewnętrznego warstwą styropianu. Do wykonania pętli przewodów posłużono się rurkami polietylenowymi o średnicy wewnętrznej 20 mm ułożonymi w 20 cm rozstawie, a następnie wypełnionymi roztworem glikolu, dzięki któremu możliwy jest odbiór bądź przekazanie ciepła do gruntowego wymiennika ciepła z którym ta wężownica została połączona. Co do konstrukcji przegrody to warstwa tworząca aktywną izolację mająca grubość 7 cm żelbetu łącznie z zalanymi wewnątrz niej rurkami została zaizolowana z obu stron styropianem EPS o wymiarach 8 cm od strony zewnętrznej i 12 cm od strony wewnętrznej. Ostatnia część konstrukcyjna ściany również została wykonana z żelbetu, ale w tym przypadku o grubości 5 cm. Autorzy w pracy nie poruszyli kwestii wyboru lokalizacji przewodów w ścianie, sprawę tę pozostawili do rozstrzygnięcia w przyszłości, zwłaszcza, że podczas oceny wyników badań wykazano ryzyko przegrzewania pomieszczenia z powodu niższej temperatury wewnętrznej w pomieszczeniu od temperatury wlotowej czynnika krążącego w pętli przegrody.

Ponadto autorzy publikacji chcąc uzupełnić brakujące dane niezmierzone w ocenianym budynku oszacowali ich wartości wykorzystując takie metody symulacyjne jak metodę różnic skończonych oraz metodę RC. Za pomocą opracowanego modelu badacze wyznaczyli, np. temperaturę w warstwie styropianu i wykazali, że dla rozwiązania z aktywną izolacją termiczną temperatura w warstwie izolacji od strony pomieszczenia jest bardziej wyrównana oraz zbliżona do temperatury wewnętrznej w ciągu roku w stosunku do tradycyjnej konstrukcji bez przewodów.

Koncepcja systemu z aktywną izolacją jest nadal rozbudowywana, np. w amerykańskich analizach opisanych w publikacji z 2022 roku [45]. Autorzy przeprowadzili badania doświadczalne oraz symulacyjne rozwiązania z aktywną izolacją w postaci miedzianych przewodów umieszczonych w piance izolacyjnej powiązaną z przegrodą aktywowaną termicznie. Wykazano potencjał takiego rozwiązania w procesie przesunięcia maksymalnego zapotrzebowania oraz możliwości obniżenia temperatury na powierzchni przegrody o 10°C od temperatury wewnętrznej w czasie chłodzenia.

Polscy naukowcy: Krzaczek, Florczuk i Tejchman [46] również przeprowadzili badania na rzeczywistym obiekcie. System oparty na barierze termicznej wbudowano w testowej i eksperymentalnej części budynku jednorodzinnego zlokalizowanego w północnej Polsce w miejscowości Warzno. Badacze Krzaczek z zespołem przeanalizowali pomiary zebrane w dniach 1.12.2015-1.05.2017, czyli przez okres 17 miesięcy. Kluczowym elementem oprócz przewodów zlokalizowanych w ścianie zewnętrznej zasilanych z dwóch gruntowych źródeł energii o różnych temperaturach jest system sterowania całym układem. Projektanci w celu opracowania mechanizmu kontroli EFMGS wykorzystali logikę rozmytą, a następnie zastosowali ten sposób kontroli w programie sterującym SVC. Jako podstawowe wnioski badacze wskazali równomierny rozkład temperatury na powierzchni wewnętrznej ściany zewnętrznej oraz możliwość wykorzystania do zasilania bariery termicznej niskotemperaturowego odnawialnego źródła energii. Kolejnym ważnym zagadnieniem było

utrzymanie w pomieszczeniu temperatury nie większej niż 0,8°C od wartości nastawionej bez względu na porę roku co jest ważne dla zachowania komfortu cieplnego.

Ponadto porównując wyniki temperatury powierzchni bariery termicznej otrzymane na drodze eksperymentalnej oraz symulacyjnej otrzymali medianę o wartości 0,041 °C przy odchyleniu standardowym 0,319. Modelowanie numeryczne przepływu ciepła wykonali w programie ABAQUS oraz pomocniczo w programie FORTRAN, który posłużył do wyznaczenia warunków brzegowych.

Kolejny sposób na zasymulowanie rurek osadzonych w konstrukcji ściany zaproponowali przywołani wcześniej chińscy uczeni Zhu i inni [47], [48], którzy połączyli model 5R2C z modelem NTU. Pierwszy z nich opisuje przepływ ciepła w płaszczyźnie dwuwymiarowej. Do tego celu naukowcy posłużyli się opisem 5 oporów oraz 2 pojemności cieplnych dla całej ściany łącząc je ze sobą tworząc w ten sposób analogię elektryczną. Kolejnym zagadnieniem było określenie wymiany ciepła w płaszczyźnie przewodu co zostało pominięte w metodzie RC i do tego celu posłużyła metoda NTU oparta na wyznaczeniu temperaturze wylotowej czynnika uwzględniając właściwości fizyczne i cieplne przewodu.

W celu zwalidowania własnego modelu [48], [49] naukowcy wykonali przegrodę rozpoczynając od ułożenia pierwszej warstwy cegły o grubość 120 mm wraz z 15 mm grubością zaprawy z jednej strony. Z drugiej strony natomiast umieszczono przewody polipropylenowe w odstępach 200 mm w zaprawie o grubości 40 mm układanej jednocześnie z następną warstwą cegieł. W ostatnim etapie drugą warstwę cegły również pokryto zaprawą 15 mm od strony zewnętrznej. Ściana ta oddziela od siebie 2 pomieszczenia wykonane z blach stalowych i zaizolowane płytami XPS, pełniące rolę dwóch środowisk: wewnętrznego i zewnętrznego. Badacze proces porównania wyników symulacji z wynikami pomiarów przeprowadzili w 2 krokach. Najpierw zestawiono parametry dla czynnika o temperaturze 18°C i prędkości przepływu 0,8 m/s tworząc w ten sposób częściowo stabilne warunki, a w następnym etapie wprowadzono impuls do układu, dzięki nagłej zmianie temperatury na 19°C i prędkości 0,5 m/s. Na podstawie odczytanych i obliczonych wartości temperatury wylotowej z pętli przewodów i oddanego przez nią ciepła oraz strumienia ciepła oddanego przez stronę zewnętrzną zauważono, że model odzwierciedla rzeczywistość. Największe rozbieżności zauważono dla niewielkich wartości przepływu ciepła, co może być związane z trudnością pomiaru ciepłomierza dla niskich zakresów przepływów.

Model 5R2C wymienieni badacze: Zhu i Xu wraz z zespołem opisali we wcześniejszej pracy [50] dotyczącej jego oceny pod kątem wykorzystania w przegrodach z wbudowanymi przewodami. Wskazali tą metodę jako odpowiednią i powiązaną z właściwościami fizycznymi materiałów ściany. Kolejny zespół badaczy. w tym przypadku z Argentyny: Hongn i inni [51] w 2022 roku wykorzystał w swoich analizach przewodów wbudowanych w przegrodę również model 5R2C i wykazał, że metoda RC jest najdokładniejsza dla najcieńszej warstwy betonu – 4 cm (prace dotyczyły grubości 4 cm, 10 cm i 20 cm).

Wykorzystanie gotowych narzędzi, w tym przypadku programu Ansys ICEM do zamodelowania struktury trójwymiarowej ściany z zawartymi wewnątrz niej rurkami przedstawili kolejni badacze z Chin Zhou i Li [52]. Dzięki użyciu numerycznej mechaniki płynów, w tym utworzeniu sześciennej siatki w środowisku ANSYS oraz dyskretyzacji

równań algorytmem SIMPLEC, uzyskano rezultaty zbliżone do wartości z pomiarów na poziomie 79%-87%. W przypadku temperatury na powierzchni ściany od strony wewnętrznej powodem otrzymania wyższej wartości rzeczywistej niż przewidywanej był przepływ powietrza przez nieszczelności na łączeniu ściany z ramą stanowiska.

Wspomniana ściana, która została poddana analizom, powstała w wyniku połączenia płyty z polistyrenu z miedzianymi rurkami i przykrycia całej konstrukcji płytą z polifenylu, tworząc w ten sposób konstrukcję o wymiarach 1200 mm x 600 mm x 25 mm. W celu zapewnienia różnicy temperatury po obu stronach przegrody, ścianę zamknięto w obudowie, a w otaczających strefach powietrznych zamontowano płyty grzewcze od strony wewnętrznej ściany obudowy. Regulator temperatury do którego podłączono 2 płyty grzewcze umożliwiał utrzymanie w strefach temperatury wyższej niż temperatura otoczenia (pomieszczenia w którym znajduje się stanowisko pomiarowe) oraz jednocześnie różnej dla każdej ze stron stref powietrznych. W wyniki przeprowadzonych symulacji stwierdzono również zależność między temperaturą zasilania przewodów wewnątrz ściany jak i ich umiejscowieniem w konstrukcji przegrody a wydajnością w sezonie chłodniczym i grzewczym. W ten sposób stwierdzono, że najkorzystniejszym położeniem rurek jest oś przegrody dzięki któremu można osiągnąć spadek zysków ciepła o 13% oraz strat ciepła o 33% dla odpowiedniego trybu pracy.

Podejście proponujące współpracę techniki przegród aktywowanych termicznie z najnowszymi materiałami budowlanymi przedstawiono w chińskiej publikacji autorstwa Chen i inni [53]. Jedna z warstw przegrody z zawartymi wewnątrz niej przewodami polietylenowymi została wykonana z materiału zmienno-fazowego (PCM). Program ANSYS DesignModeler posłużył do zdefiniowania modeli 3 przypadków przegród: tradycyjnej, ulepszonej warstwą PCM oraz zintegrowanej z przewodami (elementem aktywowanym termicznie) znajdującymi się w warstwie PCM. Uzyskane wyniki przeanalizowano pod kątem zużycia energii, a co się z tym wiąże z kosztami ekonomicznymi oraz znaczenia rozstawu przewodów, grubości warstwy z materiałem PCM i usytuowania przegrody. Rozwiązanie z materiałem zmienno-fazowym współdziałającym z przegrodą aktywowaną termicznie okazało się najkorzystniejsze pod względem finansowym ograniczając koszty eksploatacyjne, ponadto zlokalizowanie przegrody od strony północnej spowodowało dodatkowe ich zmniejszenie. Co do zmiany grubości warstwy to w badaniach analizowane poszczególne wielkości dotyczące oszczędności energii, zmniejszenia obciążenia grzewczego oraz kosztów nie różniły się znacząco jak to miało natomiast miejsce w przypadku zmiany rozstawu przewodów w ścianie.

Przygotowane stanowisko pomiarowe składające się ze ściany o wymiarach 100 cm x 100 cm i wykonanej z 5 warstw w kolejności od strony zewnętrznej: polistyren XPS – 4 cm, tynk – 4 cm, warstwa z materiałem zmienno-fazowym – 4 cm z rurkami o średnicy 20 mm x 1,3 mm i kończąc powierzchnią tynku o grubości 2 cm posłużyło naukowcom Chen i inni do zwalidowania modelu. Uzyskane rezultaty badań i symulacji są do siebie zbliżone natomiast odstępstwa, które zauważono są prawdopodobnie spowodowane właściwościami materiału zmienno-fazowego, które zostały odczytane z literatury bądź uległy zmianom w wyniku powstania pustek podczas montażu materiału w formie mikrokapsułek.

Kolejni naukowcy tym razem z ośrodków naukowych we Francji i Libanie: Ibrahim i inni również przedstawili rezultaty walidacji modelu numerycznego z wynikami badań doświadczalnych [54]. W tej sytuacji koncepcja dotyczyła umieszczenia przewodów na ścianach o grubości 16 cm (12 cm betonu, 4 cm izolacji) prostopadłościanu o wymiarach 2,25 m x 1,60 m x 1,2 m (długość x szerokość x wysokość). Pętla wykonana z miedzianych przewodów została ułożona pod warstwą izolacji zewnętrznej od strony północnej, natomiast na części południowej w izolacji jak najbliżej powietrza zewnętrznego. Na pozostałych powierzchniach rurki zamontowano w ten sposób, aby umożliwić przepływ wody z pętli umieszczonej na południowej stronie do północnej. Dodatkowo dzięki umieszczeniu w takich samych warunkach, tj. na otwartej przestrzeni identycznego stanowiska jedynie z taką różnicą, że bez przewodów (rozwiązanie bazowe) umożliwiono ocenę pomysłu i działania takiego systemu. Podczas badań przeprowadzonych w okresie zimowym zauważono wyższą temperaturę na powierzchni ściany północnej w porównaniu z rozwiązaniem bazowym, co jest wynikiem akumulacyjności cieplnej warstwy konstrukcyjnej. Efekt odwrotny, czyli obniżenie temperatury zaobserwowano na stronie południowej z powodu przechwycenia energii promieniowania słonecznego przez rurki znajdujące się pod powierzchnią izolacji. Temperatura wewnętrzna dla rozwiązania z przewodami była wyższa nawet o 3°C podczas wysokiego nasłonecznienia w porównaniu z koncepcją bazową.

Jako metodę numeryczną zastosowali metodę objętości kontrolnych pomijając przewodzenie ciepła na długości przewodu tworząc w ten sposób 2 wymiarową analizę przepływu ciepła. Model ten posłużył do zasymulowania reakcji na zmienne warunki klimatyczne oraz porównania z wynikami eksperymentu. W pierwszym przypadku przeprowadzono analizy dla 4 europejskich miast: Barcelony (Hiszpania), Marsylii (Francja), Mediolanu (Włochy) oraz Zurychu (Szwajcaria), z których wyciągnięto wniosek, że dla klimatu śródziemnomorskiego rozwiązanie to przynosi największe korzyści w formie ograniczenia strat ciepła przez powierzchnię północną. Porównując wyniki eksperymentu z rezultatami teoretycznymi zauważono zbliżone wartości. Pewne rozbieżności minimalnej dobowej temperatury dla modelu numerycznego wynikają z niedoszacowania zgromadzonej energii.

Naukowcy z Meksyku oraz Hiszpanii: Uribe i inni przedstawili w swojej publikacji [55] wyniki pracy badawczej oraz obliczeń symulacyjnych systemu opartego na barierze termicznej umieszczonej wewnątrz przegrody zewnętrznej budynku wolnostojącego. Pozostałymi głównymi elementami układu był: kolektor słoneczny oraz gruntowy wymiennik ciepła. Betonowa ściana zewnętrzna o grubości 15 cm z wbudowanymi rurkami PP została zaizolowana z obu stron 5 cm warstwą polistyrenu. Kolektor słoneczny stanowił część składową dachu w ten sposób, że polipropylenowe przewody zostały zamontowane między stalową blachą dachu oraz płytą izolacyjną z polistyrenu. W przypadku wykorzystania energii gruntu pozyskano ją z różnych części pod budynkiem o obszarze 10 m^2 (obszar gorący, ciepły i chłodny) oraz poza nim w odległości 1 m (pole zimne). Poszczególne strefy oddzielono od siebie za pomocą płyt styropianowych. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono wyrównanie temperatury na powierzchni wewnętrznej przegród i ograniczenie zapotrzebowania na energię. Program Comsol Multiphysics wykorzystujący metodę

elementów skończonych posłużył natomiast do symulacji pracy kolektora słonecznego oraz zachowania przegrody z barierą termiczną. W tym przypadku zauważono wpływ zdolności pochłaniania energii przez pokrycie dachowe w różnych temperaturach zewnętrznych jak i oddziaływanie temperatury otoczenia na temperaturę w pomieszczeniu i ściany z barierą termiczną. System umożliwia również utrzymanie komfortu cieplnego bez względu na porę roku za sprawą wykorzystania energii zgromadzonej w gruncie do zasilania bariery termicznej.

Kwestia pozyskiwania informacji do zarządzania ciepłem w budynku została poruszona przez tych samych badaczy w artykule [56]. Autorzy użyli w tym celu sieci semantycznej do opisu systemu z barierą termiczną wraz z układem czujników. Końcowy efekt pozwolił na stwierdzenie, że zaproponowany model kontroli spełnia swoją funkcję.

3.2. Wyniki badań doświadczalnych przegród aktywowanych termicznie

Zastosowanie materiału budowlanego w połączeniu z systemem opartym na elemencie aktywowanym termicznie przedstawili w publikacji autorzy z Indii i Singapuru: Dharmasastha i inni [57]. Badania przeprowadzono w wolnostojącym budynku, którego dach został wykonany z betonu zintegrowanego z gipsem wzmocnionym włóknem szklanym. Dodatkowo w konstrukcję przegrody wprowadzono miedziane rurki umieszczając je w części powietrznej pustaka dachowego i pod belkami zbrojenia w obu przypadkach zalewając je betonem. W ramach badań przeprowadzono pomiary temperatury wewnątrz i na powierzchni dachu oraz na powierzchni pozostałych przegród, dodatkowo zmierzono temperaturę powietrza wewnętrznego w stanowisku pomiarowym. Na podstawie uzyskanych rezultatów zauważono spadek dobowych wahań temperatury na powierzchni dachu: w miejscu zbrojenia o 6,7°C, a pod strefą pustki powietrznej o 5,1°C w odniesieniu do warunków bez chłodzenia. W przypadku temperatur po obu stronach dachu w porze nocnej, to dla powierzchni wewnętrznej wartość minimalna była wyższa o 2,8°C od wartości po stronie zewnętrznej. Dla wariantu bez chłodzenia różnica ta osiągnęła poziom 2,2°C. Utrzymanie stabilnej temperatury na powierzchni przegród sprzyja zachowaniu warunków komfortu cieplnego.

Hiszpańscy badacze: Romani, Perez i de Gracia przeprowadzili pomiary na 2 obiektach eksperymentalnych o wymiarach wewnętrznych 5,25 m x 2,7 m x 2,7 m skonstruowanych specjalnie do tego celu [58]. Konstrukcję dachu płaskiego wykonano w technologii betonowej zaizolowanej 8 cm polistyrenem, natomiast ściany w systemie murowanym (cegła o grubości 18,5 cm) z 6 cm izolacją. W jednym z budynków zastosowano fasady wentylowane, a po stronie wewnętrznej w bruzdach o głębokości 36 mm z odstępem co 150 mm na powierzchni ceglanej ściany umieszczono przewody polietylenowe o średnicy 18 mm, które następnie przykryto zaprawą cementową. Rurki zasilano czynnikiem przygotowanym w gruntowej pompie ciepła, natomiast powietrzna pompa ciepła posłużyła jako źródło w obiekcie bazowym. Badania wykonano podczas 4 etapów pracy związanym z użyciem systemu chłodzenia czyli: ciągłe chłodzenie, ładowanie w porze nocnej, praca zgodnie z harmonogramem użytkowania oraz okres wyłączenia chłodzenia. W czasie ciągłej pracy systemu rozwiązanie z rurkami okazało się korzystniejsze od opcji bazowej pod względem zużycia energii dla temperatur wewnętrznych 24°C oraz 26°C i oszczędność ta wynosiła

odpowiednio 54,34% oraz 82,08%. Podczas aktywności nocą zaobserwowano dodatkowo dla tego typu ściany wyrównanie temperatury w pomieszczeniu, co sprzyja utrzymaniu komfortu cieplnego. Praca z przerwami okazała się jednak mniej opłacalna odnośnie zużycia energii dla zmodyfikowanej konstrukcji: dla terminarza domowego zużycie wzrosło o 7,85% natomiast w momencie funkcji pracy biurowej spadło o 20,21% w stosunku do obiektu porównawczego. W trakcie wyłączenia trybu chłodzenia temperatura w budynku z wbudowanymi przewodami była niższa średnio o 1°C w porównaniu z konstrukcją tradycyjną.

W kolejnym artykule [59] ci sami badacze Romani i inni przedstawili wyniki odnośnie trybu grzania. Badania ponownie przeprowadzono dla 4 opcji wykorzystania systemu grzewczego, czyli: praca ciągła, ogrzewanie zgodnie z harmonogramem, wykorzystanie godzin nocnych oraz dopasowanie do najodpowiedniejszego trybu działania. Podczas pracy ciągłej ogrzewania system współpracujący z rurkami wbudowanymi w ścianę zużywa mniej energii niż klasyczne rozwiązanie bez przewodów, nawet o 40,74% dla temperatury wewnątrz pomieszczenia równej 22°C. W chwili dostosowania ogrzewania do grafiku przebywania użytkowników wartości te nie są już tak korzystne: dla użytkowników domowych oszczędności są już na poziomie 13,53%, natomiast dla pracowników biurowych wystąpił wzrost zużycia energii o 29,54% dla temperatury wewnętrznej 24°C. Badania przeprowadzone nocą pozwoliły natomiast stwierdzić, który system lepiej wykorzystuje pojemność cieplną i jak to wpływa na komfort cieplny, w takim przypadku najodpowiedniejszym rozwiązaniem jest ściana z wbudowanymi rurkami. Podobnie jak w sytuacji wyboru najlepszego trybu działania, gdy dla zmodyfikowanej konstrukcji osiągnięto spadek zużycia energii w granicach 5,10% – 35,44%.

Temat z poprzednich 2 publikacji był kontynuowany przez tych samych dwóch naukowców: Romani i de Gracia oraz dodatkowo Cabeza w artykule [60], tym razem pod kątem porównania wyników badań z obliczeniami symulacyjnymi. Wykorzystując metodę objętości skończonych opracowali model dla ściany zawierającej przewody w swojej konstrukcji. Obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla 3 ścian różniących się pod względem ustawienia w kierunku stron świata jak i liczby pętli ułożonych tak na powierzchni aby ich długość była jednakowa: wschodnia – 1 pętla, zachodnia – 1 pętla oraz południowa – 2 pętle. Przewidywane wartości: temperatur na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej ściany oraz przepływu ciepła okazały się zbliżone do wyników pomiarów. W kolejnym etapie przeprowadzono analizę najkorzystniejszego rozstawu jak i głębokości osadzenia przewodów. Stwierdzono, że najkorzystniejszym rozwiązaniem odnośnie zmniejszenia różnicy temperatur na powierzchni wewnętrznej ściany oraz zwiększenia przekazywanego strumienia ciepła jest umieszczenie przewodów co 125 mm – 150 mm w odległości od 45 mm do 65 mm od powierzchni wewnętrznej ściany.

4. Model ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie

W ramach rozprawy doktorskiej wykonano model ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie.

W poniższym rozdziale przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych dla przegrody, która w następnym etapie prac została poddana badaniom eksperymentalnym opisanym w kolejnym rozdziale 5. Przegrodą tą była ściana zewnętrzna o łącznej grubości 43 cm, wykonana odpowiednio z warstwy betonu o grubości 15 cm zaizolowanej z obu stron styropianem o tej samej grubości 13 cm. Element aktywowany termicznie stanowiła pętla przewodów polipropylenowych o średnicy 20 x 2 mm ułożona w warstwie betonu w osi symetrii przegrody. Czynnikiem grzewczym (płynem) była woda, której temperatura zasilania zawierała się z zakresu 16°C, 18°C, 20°C i 22°C. Właściwości cieplne materiałów budowlanych w większości przypadków zostały odczytane z kart technicznych producenta, a w razie braku danych z źródeł literaturowych. W kwestii charakterystyki betonu zlecono badania gęstości oraz parametrów cieplnych (współczynnika przewodzenia ciepła oraz ciepła właściwego) Katedrze Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

4.1. Charakterystyka i klasyfikacja metod numerycznych

Do opisania wymiany ciepła w przegrodach stosuje się metody matematyczne: analityczne oraz numeryczne [61]. Pierwsze podejście (dokładne) polega na rozwiązaniu równań różniczkowych, które w niektórych warunkach będzie zbyt trudne bądź niemożliwe do wykonania [61], [62] i [63], dodatkowo przyjęcie koniecznych uproszczeń wpływa na niedoskonałość wyniku [63]. W efekcie metody analityczne stosowane są dla ciał o prostych kształtach i mniej złożonych warunków brzegowych [63] i [64]. W przypadku metod numerycznych (przybliżonych) wyznaczenie pola temperatury następuje dzięki przyjęciu układu dyskretnego, a nie ciągłego [61] i [62], a następnie podziałowi obszaru na elementy dyskretne.

Metody wyróżnia się w zależności od momentu, w którym przeprowadzi się dyskretyzację:

- przy dyskretyzacji przed zbudowaniem modelu matematycznego – metoda bilansów elementarnych (MBE),
- dla dyskretyzacji modelu matematycznego opracowanego dzięki założeniu ciągłości przestrzennej i czasowej – metoda różnic skończonych (MRS), metoda elementów skończonych (MES), metoda elementów brzegowych (MEB) [62].

4.2. Wybór metody numerycznej MBE (metody bilansów elementarnych)

Pole temperatury przegrody – ściany zewnętrznej obliczono metodą bilansów elementarnych. Metodę tą wybrano ze względu na najprostszą interpretację fizyczną i łatwość opracowania zagadnień nieliniowych [62].

4.3. Model przewodzenia ciepła w przegrodzie

Konstrukcja przegrody została wprowadzona do 2D układu odniesienia i podzielona na kwadratowe pola o wymiarach $\Delta x = \Delta y = 0{,}01$ m tworząc siatkę elementów dyskretnych. Wymiar prostopadły do płaszczyzny rysunku Δz został przyjęty jako 1 m. Na rysunku (Rys. 4.1) zobrazowano podział ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie na komórki bilansowe. Każdemu elementowi przypisano literę i przyporządkowano równanie temperatury na końcu kroku czasowego w elemencie brzegowym bądź elemencie wewnętrznym, które zestawiono w tablicy (Tablica 4.1). Równania wyprowadzono zakładając nieustalony przepływ ciepła, określając warunek stabilności modelu na podstawie wzorów (1) i (2) oraz wykorzystując zależności na strumień ciepła (3) i (4).

Dopuszczalna wartość kroku czasowego wyznaczona została z:

$$\Delta\tau_{max} = \frac{1}{2a\left(\frac{1}{\Delta x^2}+\frac{1}{\Delta y^2}\right)} \tag{1}$$

gdzie:
a – współczynnik wyrównania temperatury, [m^2/s],
Δx – krok przestrzenny w kierunku osi x, [m],
Δy – krok przestrzenny w kierunku osi y, [m].

$$a = \frac{\lambda}{c\cdot\rho} \tag{2}$$

gdzie:
λ – współczynnik przewodzenia ciepła materiału, [W/(m·K)],
c – ciepło właściwe materiału, [J/(kg·K)],
ρ – gęstość materiału, [kg/m^3].

Strumień ciepła określono za pomocą:

$$\dot{Q} = \sum_{j=1}^{4}\left(\frac{1}{R}\cdot A\cdot \Delta T_j\right) \tag{3}$$

gdzie:
R – opór cieplny między danymi segmentami, [m^2·K/W],
A – powierzchnia wymiany ciepła pomiędzy danymi segmentami, [m^2],
ΔT_j – różnica temperatur między segmentami, [K].

$$\dot{Q}\cdot\Delta\tau = m\cdot c\cdot\Delta T \tag{4}$$

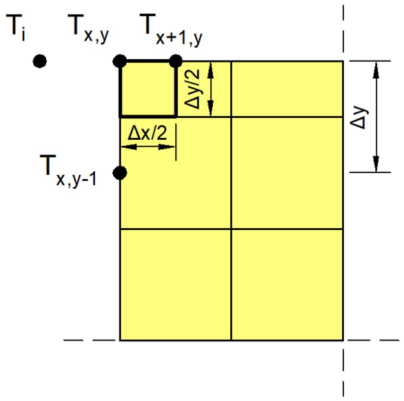
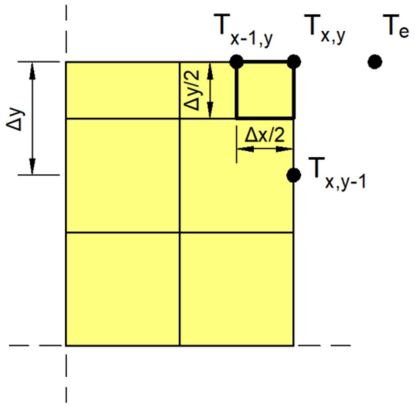
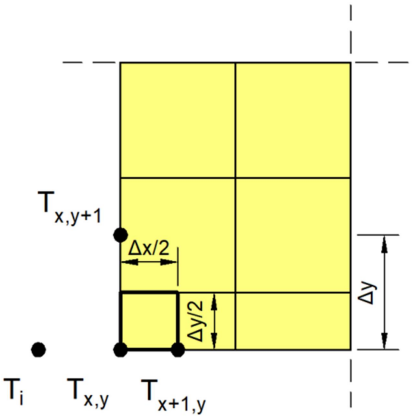
gdzie:
m – masa komórki bilansowej, [kg],
c – ciepło właściwe komórki bilansowej, [J/(kg·K)],
ΔT – przyrost temperatury w komórce bilansowej, [K].

Założono, że przegroda z prawej strony styka się z powietrzem zewnętrznym, natomiast z lewej strony z powietrzem wewnętrznym.

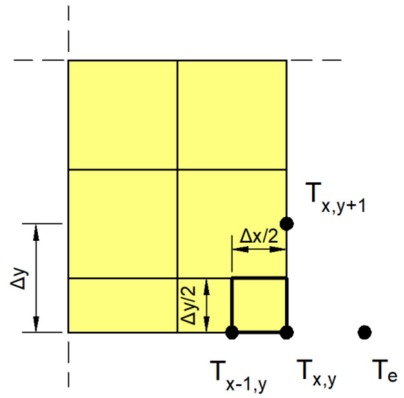
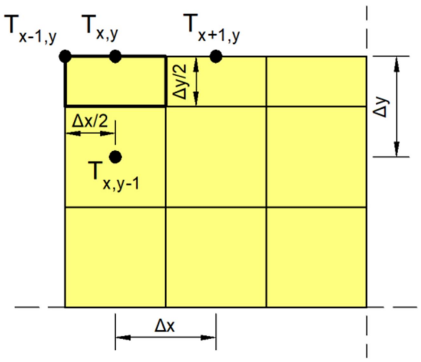
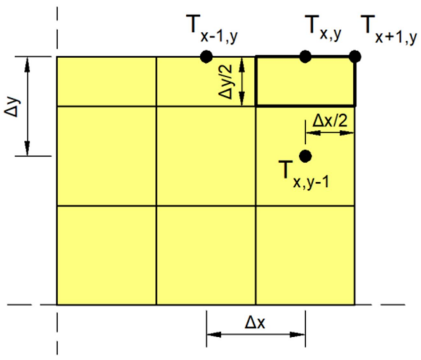
A	C	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	J	L	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	J'	L'	N'	F'	F'	F'	F'	F'	F'	F'	F'	F'	F'	C'	A'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	AA	Y	AA'	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	AB		AB'	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	AC	Z	AC'	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
P	D	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	R	S	T	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	R'	S'	T'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	U'	D'	P'
B	E	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	K	M	O	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	K'	M'	O'	G'	G'	G'	G'	G'	G'	G'	G'	G'	G'	E'	B'

Rys. 4.1. Podział ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie na komórki bilansowe

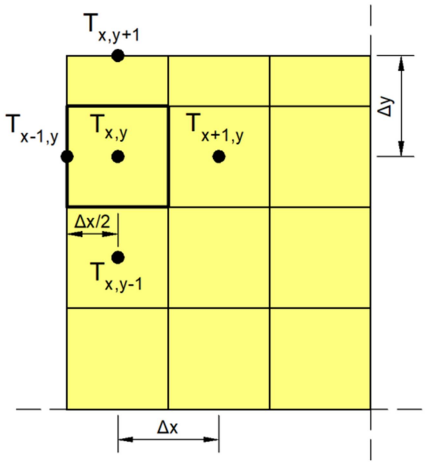
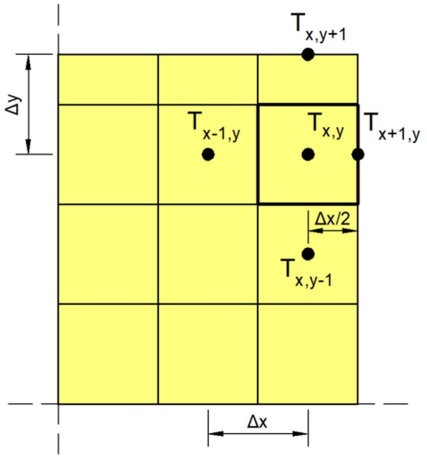
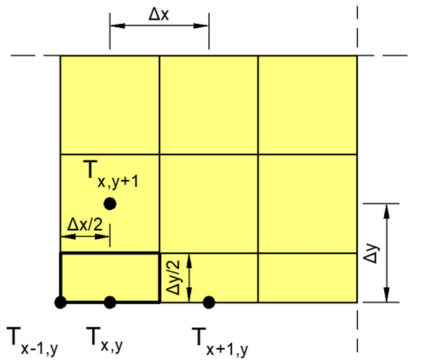
Tablica 4.1. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
A		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4 \cdot \Delta\tau}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho_s \cdot c_s} \cdot \left[\frac{2 \cdot \lambda_s}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(T_{x+1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_s}{\Delta y} \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \left(T_{x,y-1} - T_{x,y}\right) + \frac{1}{R_{si}} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(T_i - T_{x,y}\right)\right]$
A’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4 \cdot \Delta\tau}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho_s \cdot c_s} \cdot \left[\frac{2 \cdot \lambda_s}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(T_{x-1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_s}{\Delta y} \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \left(T_{x,y-1} - T_{x,y}\right) + \frac{1}{R_{se}} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(T_e - T_{x,y}\right) + G_c \cdot \left(1 - Alb_s\right) \cdot \frac{\Delta y}{2}\right]$
B		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4 \cdot \Delta\tau}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho_s \cdot c_s} \cdot \left[\frac{2 \cdot \lambda_s}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(T_{x+1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_s}{\Delta y} \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \left(T_{x,y+1} - T_{x,y}\right) + \frac{1}{R_{si}} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(T_i - T_{x,y}\right)\right]$

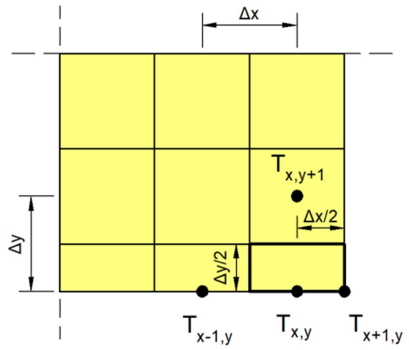
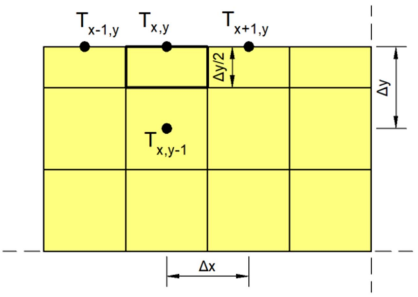
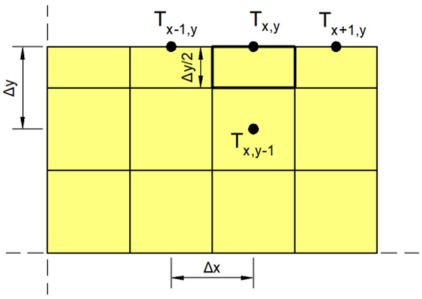
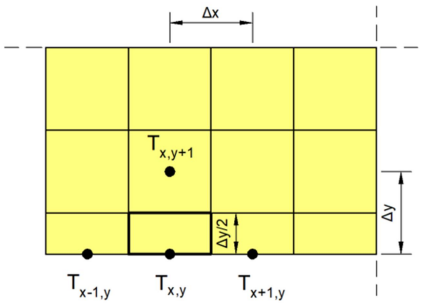
Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
B’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)+\frac{1}{R_{se}}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_e-T_{x,y}\right)+G_c\cdot(1-Alb_s)\cdot\frac{\Delta y}{2}\right]$
C		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)\right]$
C’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)\right]$

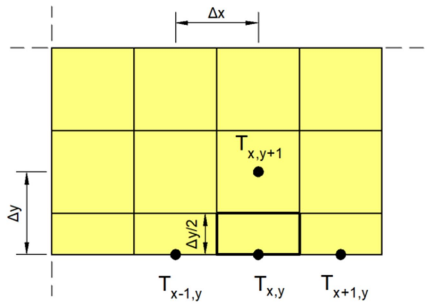
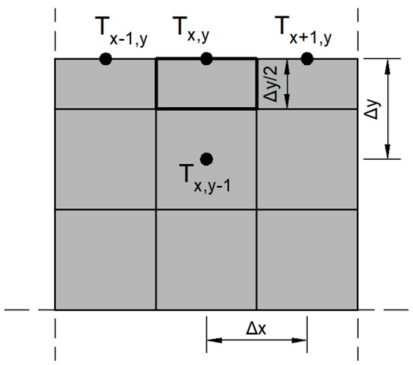
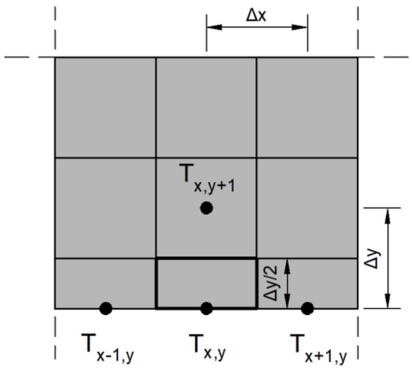
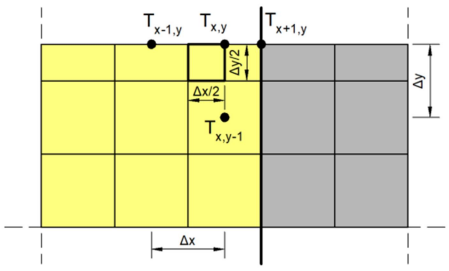
Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
D		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{\Delta\tau}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho_s \cdot c_s} \cdot \left[\frac{2 \cdot \lambda_s}{\Delta x} \cdot \Delta y \cdot \left(T_{x-1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_s}{\Delta x} \cdot \Delta y \cdot \left(T_{x+1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_s}{\Delta y} \cdot \Delta x \cdot \left(T_{x,y-1} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_s}{\Delta y} \cdot \Delta x \cdot \left(T_{x,y+1} - T_{x,y}\right)\right]$
D’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{\Delta\tau}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho_s \cdot c_s} \cdot \left[\frac{\lambda_s}{\Delta x} \cdot \Delta y \cdot \left(T_{x-1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{2 \cdot \lambda_s}{\Delta x} \cdot \Delta y \cdot \left(T_{x+1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_s}{\Delta y} \cdot \Delta x \cdot \left(T_{x,y-1} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_s}{\Delta y} \cdot \Delta x \cdot \left(T_{x,y+1} - T_{x,y}\right)\right]$
E		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2 \cdot \Delta\tau}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho_s \cdot c_s} \cdot \left[\frac{2 \cdot \lambda_s}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(T_{x-1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_s}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(T_{x+1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_s}{\Delta y} \cdot \Delta x \cdot \left(T_{x,y+1} - T_{x,y}\right)\right]$

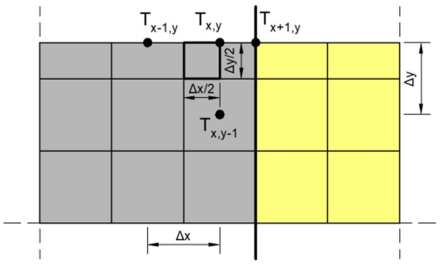
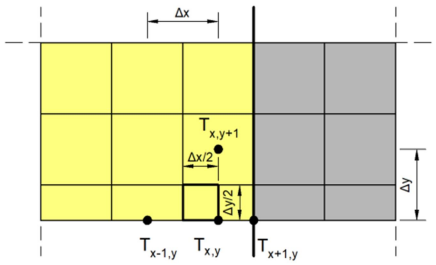
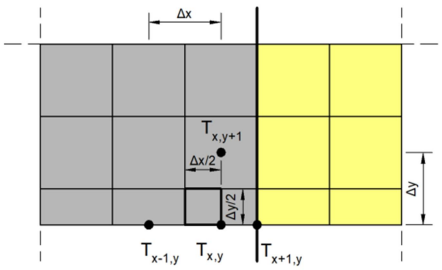
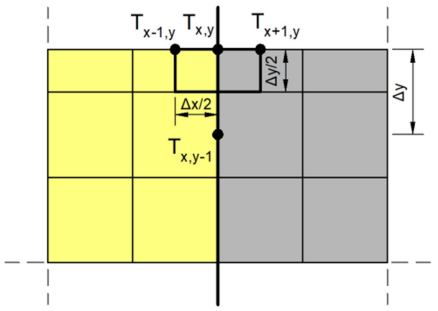
Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
E’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$
F		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)\right]$
F’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)\right]$
G		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$

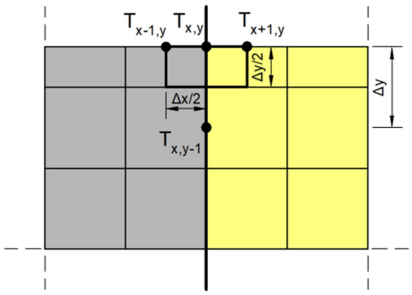
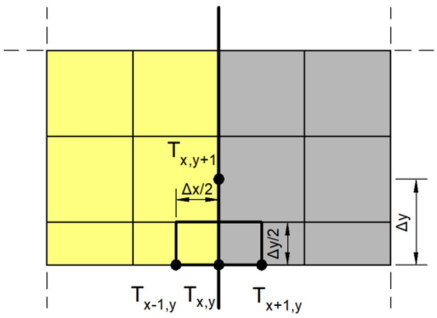
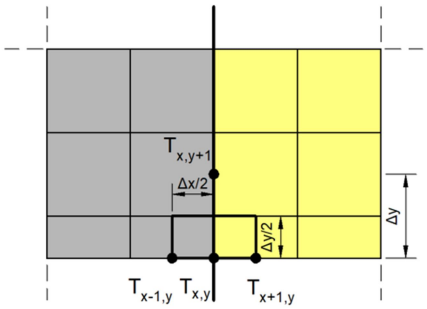
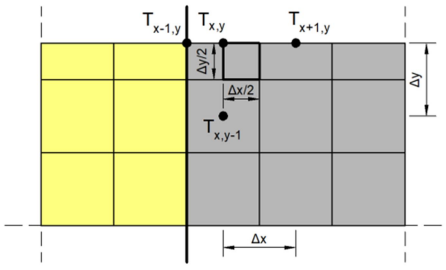
Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
G’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$
H		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot\left[\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)\right]$
I		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot\left[\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$
J		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)\right]$

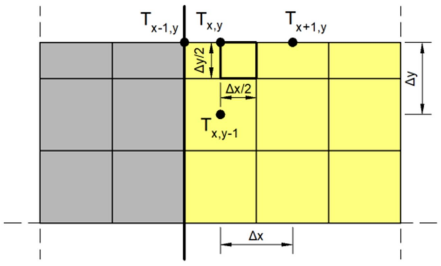
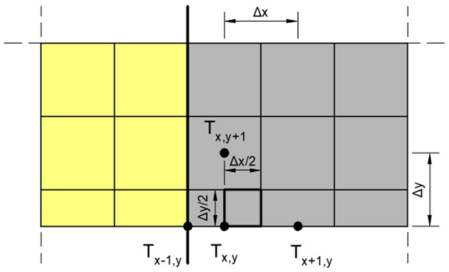
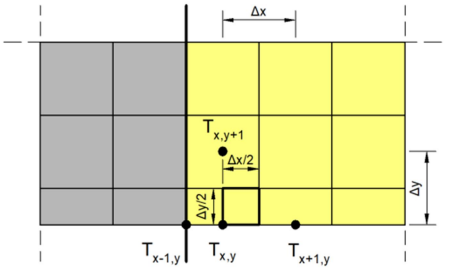
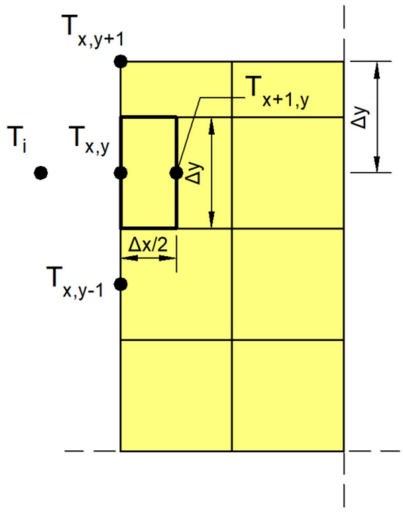
Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
J’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot\left[\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{2\cdot\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)\right]$
K		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$
K’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot\left[\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{2\cdot\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$
L		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot(\rho_s\cdot c_s+\rho_b\cdot c_b)}\cdot\left[\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{2\cdot\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\Delta x}{2}\cdot\frac{1}{\Delta y}\cdot(\lambda_s+\lambda_b)\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)\right]$

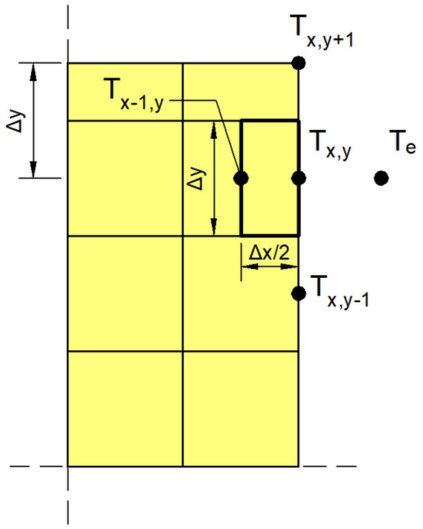
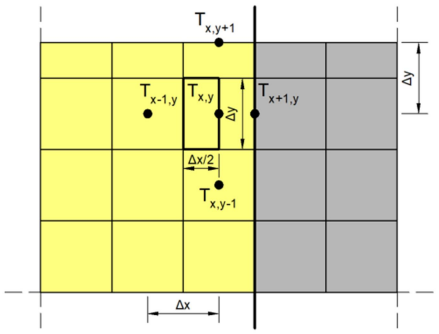
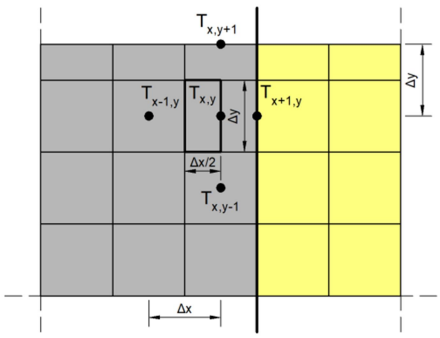
Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
L’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot(\rho_b\cdot c_b+\rho_s\cdot c_s)}\cdot \left[\frac{2\cdot\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot(T_{x-1,y}-T_{x,y})+\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot(T_{x+1,y}-T_{x,y})+\frac{\Delta x}{2}\cdot\frac{1}{\Delta y}\cdot(\lambda_b+\lambda_s)\cdot(T_{x,y-1}-T_{x,y})\right]$
M		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot(\rho_s\cdot c_s+\rho_b\cdot c_b)}\cdot \left[\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot(T_{x-1,y}-T_{x,y})+\frac{2\cdot\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot(T_{x+1,y}-T_{x,y})+\frac{\Delta x}{2}\cdot\frac{1}{\Delta y}\cdot(\lambda_s+\lambda_b)\cdot(T_{x,y+1}-T_{x,y})\right]$
M’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot(\rho_b\cdot c_b+\rho_s\cdot c_s)}\cdot \left[\frac{2\cdot\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot(T_{x-1,y}-T_{x,y})+\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot(T_{x+1,y}-T_{x,y})+\frac{\Delta x}{2}\cdot\frac{1}{\Delta y}\cdot(\lambda_b+\lambda_s)\cdot(T_{x,y+1}-T_{x,y})\right]$
N		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot \left[\frac{2\cdot\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot(T_{x-1,y}-T_{x,y})+\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot(T_{x+1,y}-T_{x,y})+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot(T_{x,y-1}-T_{x,y})\right]$

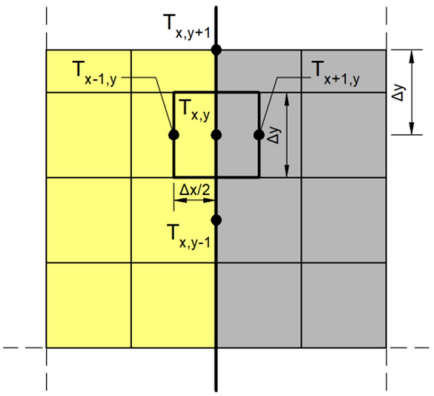
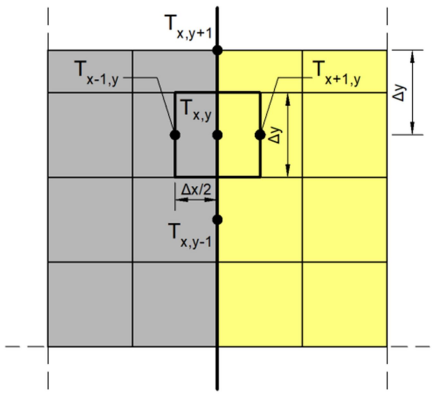
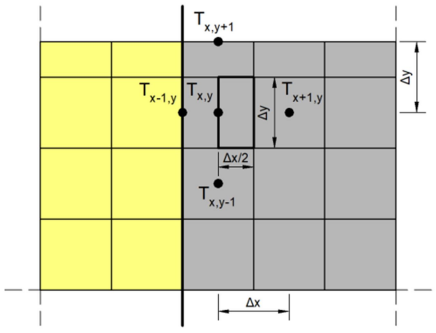
Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
N’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$
O		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot\left[\frac{2\cdot\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$
O’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$
P		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)+\frac{1}{R_{si}}\cdot\Delta y\cdot\left(T_i-T_{x,y}\right)\right]$

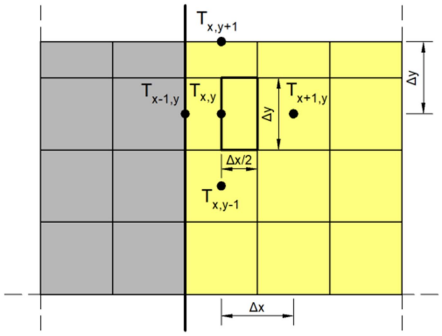
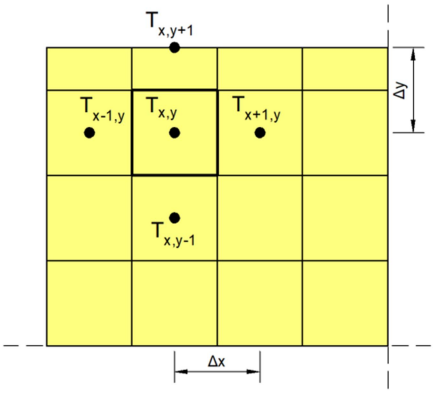
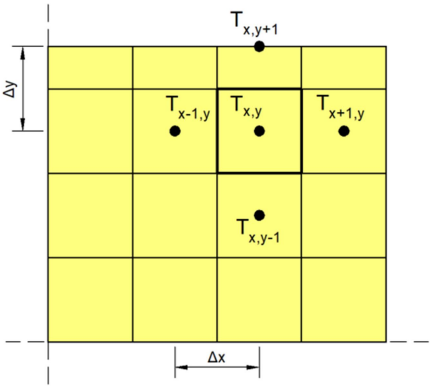
Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
P’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)+\frac{1}{R_{se}}\cdot\Delta y\cdot\left(T_e-T_{x,y}\right)\right]$
R		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$
R’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot\left[\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{2\cdot\lambda_b}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$

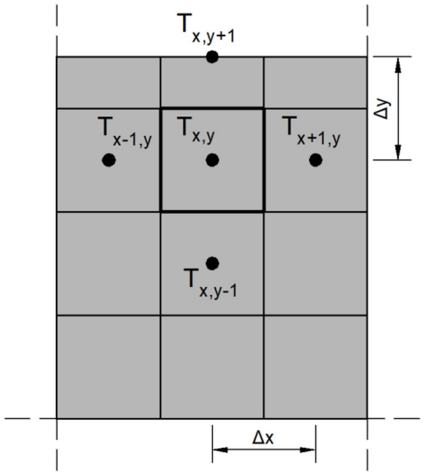
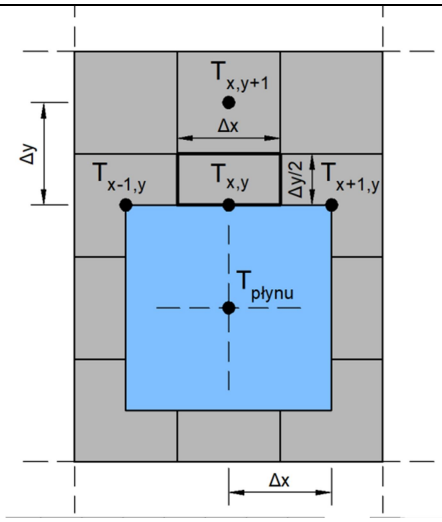
Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
S		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot(\rho_s\cdot c_s+\rho_b\cdot c_b)}\cdot \left[\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{2\cdot\lambda_b}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\Delta x}{2}\cdot\frac{1}{\Delta y}\cdot(\lambda_s+\lambda_b)\left(T_{x,y-1}+T_{x,y+1}-2\cdot T_{x,y}\right)\right]$
S’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot(\rho_b\cdot c_b+\rho_s\cdot c_s)}\cdot \left[\frac{2\cdot\lambda_b}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\Delta x}{2}\cdot\frac{1}{\Delta y}\cdot(\lambda_b+\lambda_s)\left(T_{x,y-1}+T_{x,y+1}-2\cdot T_{x,y}\right)\right]$
T		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot \left[\frac{2\cdot\lambda_b}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$

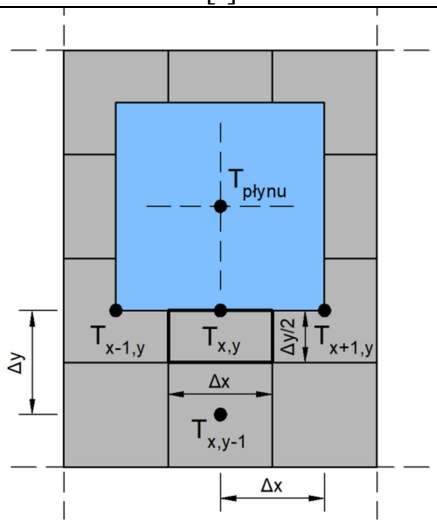
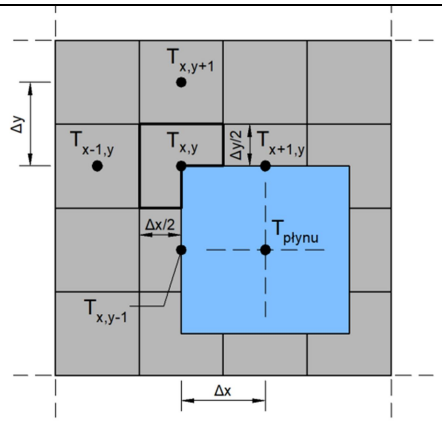
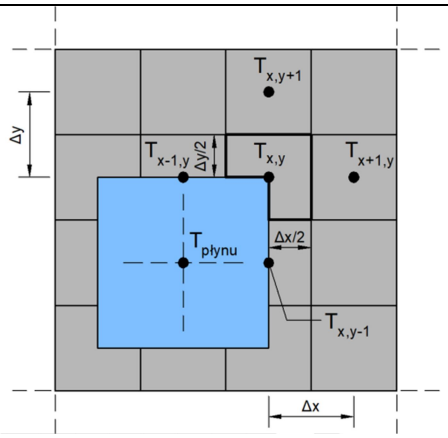
Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
T’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{2\cdot\lambda_s}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$
U		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$
U’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_s\cdot c_s}\cdot\left[\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_s}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)\right]$

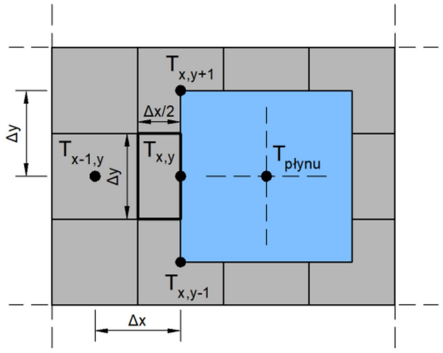
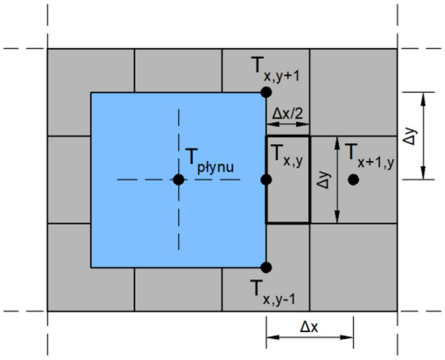
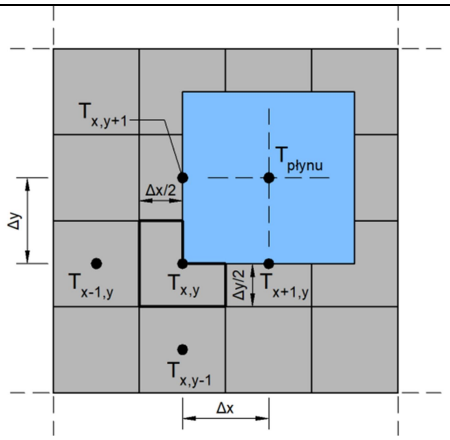
Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
W		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{\Delta\tau}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho_b \cdot c_b} \cdot \left[\frac{\lambda_b}{\Delta x} \cdot \Delta y \cdot \left(T_{x-1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_b}{\Delta x} \cdot \Delta y \cdot \left(T_{x+1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_b}{\Delta y} \cdot \Delta x \cdot \left(T_{x,y-1} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_b}{\Delta y} \cdot \Delta x \cdot \left(T_{x,y+1} - T_{x,y}\right)\right]$
Y		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2 \cdot \Delta\tau}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho_b \cdot c_b} \cdot \left[\frac{\lambda_b}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(T_{x-1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_b}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(T_{x+1,y} - T_{x,y}\right) + \frac{\lambda_b}{\Delta y} \cdot \Delta x \cdot \left(T_{x,y+1} - T_{x,y}\right) + q_{płynu} \cdot \Delta x\right]$

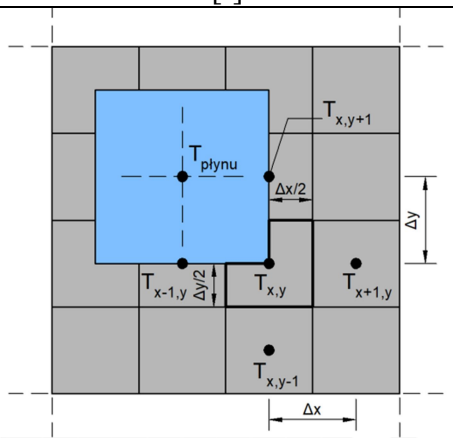
Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
Z		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot\left[\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+q_{płynu}\cdot\Delta x\right]$
AA		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{3\cdot\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot\left[\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)+q_{płynu}\cdot\frac{\Delta x}{2}+q_{płynu}\cdot\frac{\Delta y}{2}\right]$
AA’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{3\cdot\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot\left[\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)+q_{płynu}\cdot\frac{\Delta x}{2}+q_{płynu}\cdot\frac{\Delta y}{2}\right]$

Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
AB		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot\left[\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)+q_{płynu}\cdot\Delta y\right]$
AB’		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{2\cdot\Delta\tau}{\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot\left[\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)+q_{płynu}\cdot\Delta y\right]$
AC		$T_{x,y}^{+} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{3\cdot\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot\left[\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)+q_{płynu}\cdot\frac{\Delta x}{2}+q_{płynu}\cdot\frac{\Delta y}{2}\right]$

Tablica 4.1. c.d. Równania temperatury w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego wraz ze schematem omawianego elementu

Oznaczenie	Schemat komórki bilansowej	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
[-]	[-]	[°C]
AC'		$T^{+}_{x,y} = T_{x,y} + \frac{4\cdot\Delta\tau}{3\cdot\Delta x\cdot\Delta y\cdot\rho_b\cdot c_b}\cdot \left[\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\frac{\Delta y}{2}\cdot\left(T_{x-1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta x}\cdot\Delta y\cdot\left(T_{x+1,y}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\Delta x\cdot\left(T_{x,y-1}-T_{x,y}\right)+\frac{\lambda_b}{\Delta y}\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot\left(T_{x,y+1}-T_{x,y}\right)+q_{płynu}\cdot\frac{\Delta x}{2}+q_{płynu}\cdot\frac{\Delta y}{2}\right]$

OBJAŚNIENIA OZNACZEŃ W TABLICY:

Alb – albedo, [-]; Alb_s – styropianu 0,66 [65],

c – ciepło właściwe materiału, [J/(kg·K)]; c_b – betonu 903 J/(kg·K) [66], c_s – styropianu 1460 J/(kg·K) [67],

G_c – całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię pionową, [W/m^2],

$q_{płynu}$ – gęstość strumienia ciepła, [W/m^2]; wyznaczona na podstawie wzoru (5),

R_{se} – opór przejmowania ciepła na zewnętrznej stronie przegrody, [m^2·K/W]; wyznaczony na podstawie wzoru (7),

R_{si} – opór przejmowania ciepła na wewnętrznej stronie przegrody, [m^2·K/W]; wyznaczony na podstawie wzoru (8),

T_e – temperatura zewnętrzna, [K],

T_i – temperatura wewnętrzna, [K],

$T_{płynu}$ – średnia temperatura czynnika grzewczego, [K], zdefiniowana jako średnia arytmetyczna temperatury zasilania i powrotu,

$T_{x,y}$ – temperatura w węźle o współrzędnych x,y, [K],

$T^{+}_{x,y}$ – temperatura w węźle na końcu kroku czasowego, [K],

Δx, Δy – krok przestrzenny, [m]; przyjęto 0,01 m,

Δτ – krok czasowy, [s]; przyjęto 5 s,

λ – współczynnik przewodzenia ciepła materiału, [W/(m·K)]; λ_b – betonu 2,24 W/(m·K) [66], λ_s – styropianu 0,031 W/(m·K) [68],

ρ – gęstość materiału, [kg/m^3]; ρ_b – betonu 2120 kg/m^3 [66], ρ_s – styropianu 30 kg/m^3 [67].

Gęstość strumienia ciepła obliczono z zależności [69]:

$$q_{płynu} = U\cdot\left(T_{płynu} - T_{x,y}\right) \tag{5}$$

gdzie:

$T_{płynu}$ – średnia temperatura czynnika grzewczego, [K]; zdefiniowana jako średnia arytmetyczna temperatury zasilania i powrotu,

$T_{x,y}$ – temperatura na ściance przewodu, [K],

U – zastępczy współczynnik przenikania ciepła pomiędzy ścianką przewodu a czynnikiem grzewczym, [W/(m^2·K)]; wyznaczony na podstawie poniższego wzoru [69]:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{płynu}} + \frac{d_p}{\lambda_p}} \tag{6}$$

gdzie:
$\alpha_{płynu}$ – współczynnik przejmowania ciepła czynnika grzewczego (płynu), [W/(m^2·K)]; wyznaczony na podstawie wzoru (9),
d_p – grubość ścianki przewodu, [m]; wyniosła 2 mm, czyli 0,002 m,
λ_p – współczynnik przewodzenia ciepła materiału przewodu, [W/(m·K)]; przyjęto dla polipropylenu 0,22 W/(m·K) [70].

Do określenia oporu przejmowania ciepła na zewnętrznej stronie przegrody posłużono się wzorem:

$$R_{se} = \frac{1}{\alpha_{ce} + \alpha_{re}} \tag{7}$$

gdzie:
α_{ce} – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję na zewnętrznej stronie przegrody, [W/(m^2·K)]; wyznaczony na podstawie wzoru (13),
α_{re} – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie na zewnętrznej stronie przegrody, [W/(m^2·K)]; wyznaczony na podstawie wzoru (15).

Opór przejmowania ciepła na wewnętrznej stronie przegrody zdefiniowano za pomocą:

$$R_{si} = \frac{1}{\alpha_{ci} + \alpha_{ri}} \tag{8}$$

gdzie:
α_{ci} – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję na wewnętrznej stronie przegrody, [W/(m^2·K)]; wyznaczony na podstawie wzoru (14),
α_{ri} – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie na wewnętrznej stronie przegrody, [W/(m^2·K)]; wyznaczony na podstawie wzoru (16).

Współczynnik przejmowania ciepła czynnika grzewczego (płynu) wyznaczono stosując zależność:

$$\alpha_{płynu} = \frac{Nu \cdot \lambda_{płynu}}{d_{wew}} \tag{9}$$

gdzie:
Nu – liczba Nusselta, [-]; wyznaczona na podstawie wzoru (10),
$\lambda_{płynu}$ – współczynnik przewodzenia ciepła czynnika grzewczego (płynu), [W/(m·K)]; przyjęto na podstawie [71],
d_{wew} – średnica wewnętrzna przewodu, [m]; wyniosła 16 mm, czyli 0,016 m.

Obliczenie liczby Nusselta jest zależne od rodzaju przepływu w przewodzie. W tym przypadku zachodzi przepływ przejściowy, czyli liczba Reynoldsa (Re) zawiera się w zakresie: $2300 < Re < 10^4$ [72]. W tym celu wykorzystano wzór Gnielińskiego o zakresie stosowalności $0,5 \leq Pr \leq 2000$ oraz $3000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$ [72]:

$$Nu = \frac{(f/8)\cdot(Re-1000)\cdot Pr}{1+12,7\cdot(f/8)^{1/2}\cdot(Pr^{2/3}-1)} \tag{10}$$

gdzie:
f – współczynnik tarcia, [-]; wyznaczony na podstawie poniższego wzoru:

$$f = (0,790 \cdot \ln Re - 1,64)^{-2} \tag{11}$$

Pr – liczba Prandtla, [-]; przyjęto na podstawie [71],
Re – liczba Reynoldsa, [-]; wyznaczony na podstawie poniższego wzoru:

$$Re = \frac{w \cdot d_{wew}}{\nu} \tag{12}$$

gdzie:
w – prędkość, [m/s]; przyjęto na podstawie badań opisanych w rozdziale 5 niniejszej pracy,
d_{wew} – średnica wewnętrzna przewodu, [m]; wyniosła 16 mm, czyli 0,016 m,
ν – współczynnik lepkości kinematycznej, [m^2/s]; przyjęto na podstawie [71].

Współczynniki przejmowania ciepła przez konwekcję [73] i promieniowanie [71] opisano zależnościami:

$$\alpha_{ce} = 1,45 \cdot \left(T_{x,y} - T_e\right)^{0,25} \tag{13}$$

$$\alpha_{ci} = 1,45 \cdot \left(T_i - T_{x,y}\right)^{0,25} \tag{14}$$

$$\alpha_{re} = \sigma \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot \frac{{T_{x,y}}^4 - {T_e}^4}{T_{x,y} - T_e} \tag{15}$$

$$\alpha_{ri} = \sigma \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot \frac{{T_{x,y}}^4 - {T_i}^4}{T_{x,y} - T_i} \tag{16}$$

gdzie:
T_e – temperatura zewnętrzna, [K],
T_i – temperatura wewnętrzna, [K],
$T_{x,y}$ – temperatura w węźle o współrzędnych x,y, [K],
σ – stała promieniowania ciała doskonale czarnego (stała Stefana-Boltzmanna), [$W/(m^2 \cdot K^4)$]; przyjęto $5,67 \cdot 10^{-8}$ $W/(m^2 \cdot K^4)$ [71],
ε_{1-2} – tzw. emisyjność wzajemna, [-]; wyznaczono na podstawie poniższego wzoru:

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\cdot\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \tag{17}$$

gdzie:
$\frac{A_1}{A_2}$ – stosunek powierzchni pierwszego ciała do drugiego, [-]; przyjęto 1,
ε_1 – emisyjność powierzchni pierwszego ciała, [-]; dla betonu przyjęto 0,88 [72],
ε_2 – emisyjność powierzchni drugiego ciała, [-]; dla płyty OSB przyjęto 0,82 [72].

4.4. Wyniki obliczeń z modelu numerycznego

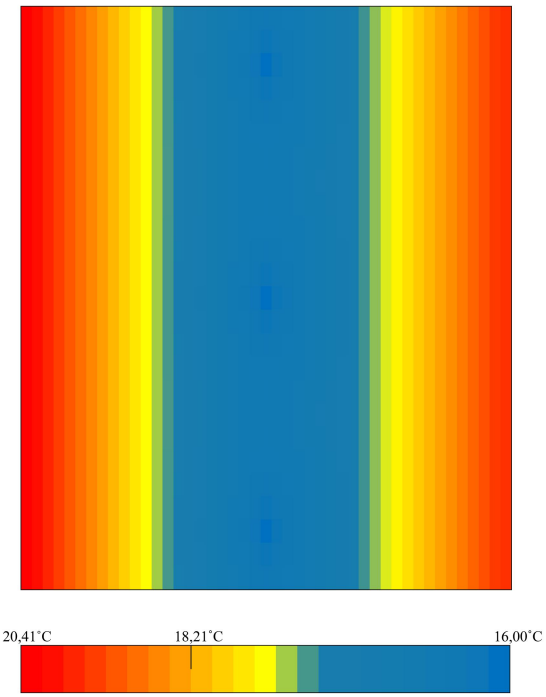
W poniższym podrozdziale zaprezentowano wyniki obliczeń modelu numerycznego dla wspomnianej zaizolowanej betonowej ściany zewnętrznej zasilanej wodą o temperaturze: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C dla 3 etapów badań (analogicznie dla tych samych przypadków przeprowadzono eksperymenty opisane w rozdziale 5):

- stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody,
- przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni,
- wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej.

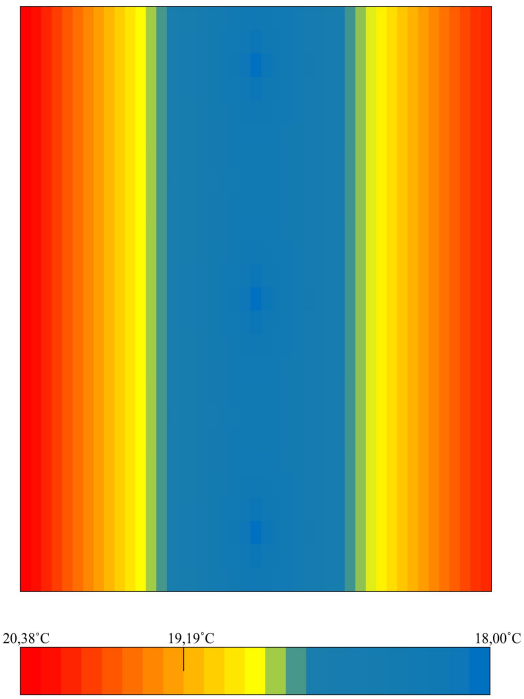
Otrzymane rezultaty zobrazowano w formie graficznej w postaci pól temperatury dla ostatnich godzin obliczeń w związku z ich cogodzinnym zapisem. Warunki początkowe przyjęto z badań scharakteryzowanych w kolejnym rozdziale 5.

4.4.1. Stabilizacja temperatury na powierzchni przegrody

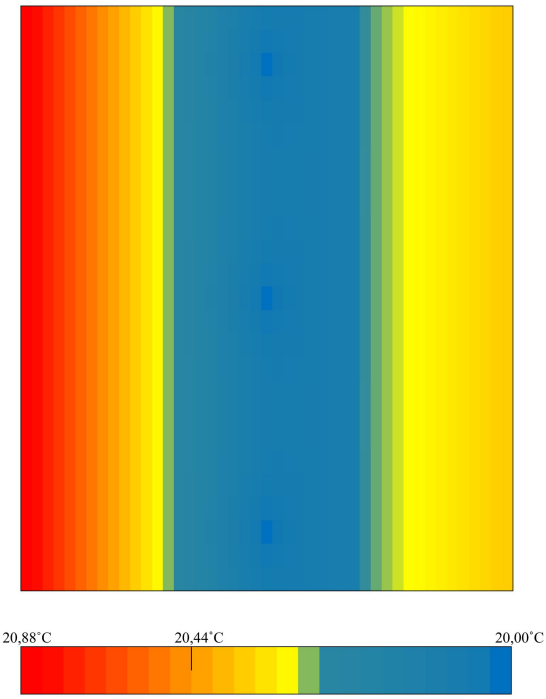
Dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody wykonano obliczenia w okresie 5 dni. Przedstawione poniżej pola temperatury dotyczą 120 godziny analiz (Rys. 4.**2**, Rys. 4.3, Rys. 4.4 i Rys. 4.5.). Temperatura na powierzchni przegrody od strony powietrza wewnętrznego i zewnętrznego osiągnęły wartości: 20,41°C i 19,77°C dla 16°C, w przypadku 18°C 20,38°C i 20,09°C, dla 20°C 20,88°C i 20,25°C, natomiast 21,31°C i 20,75°C w sytuacji zasilania pętli wodą o temperaturze 22°C. Różnice temperatury na powierzchni obu stron przegrody nieprzekraczające w najgorszym przypadku 0,64°C wynikają z przyjęcie stałej temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego przez cały okres analiz.



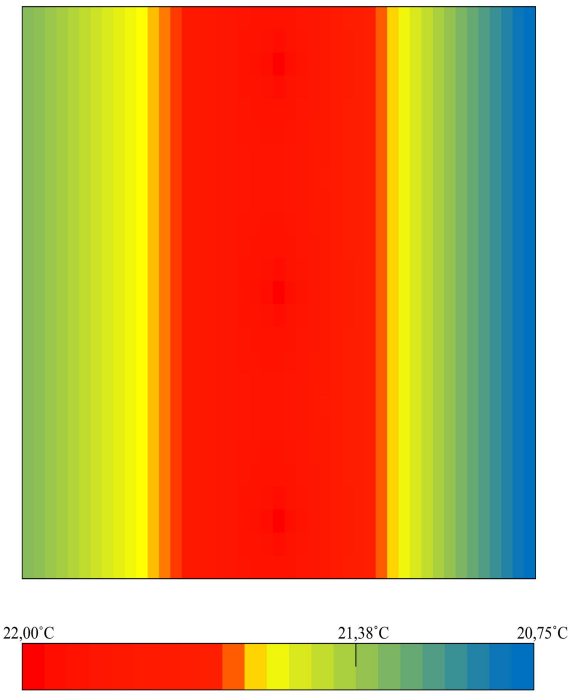
Rys. 4.2. Schemat pola temperatury dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie dla stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody po okresie 5 dni przy temperaturze zasilania równej 16°C



Rys. 4.3. Schemat pola temperatury dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie dla stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody po okresie 5 dni przy temperaturze zasilania równej 18°C



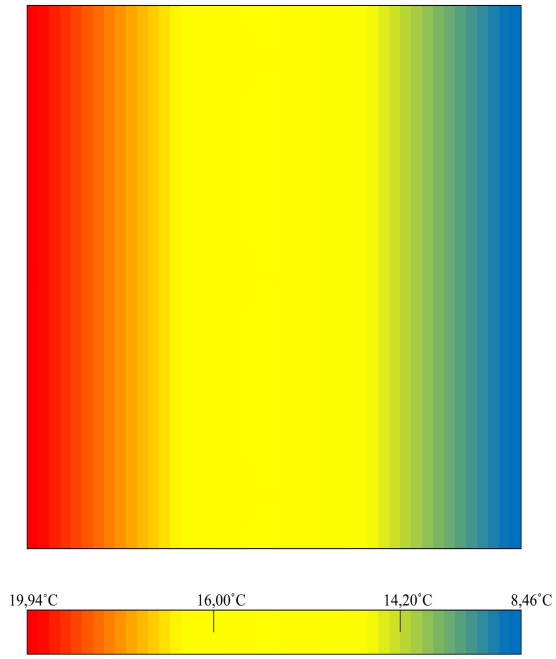
Rys. 4.4. Schemat pola temperatury dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie dla stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody po okresie 5 dni przy temperaturze zasilania równej 20°C



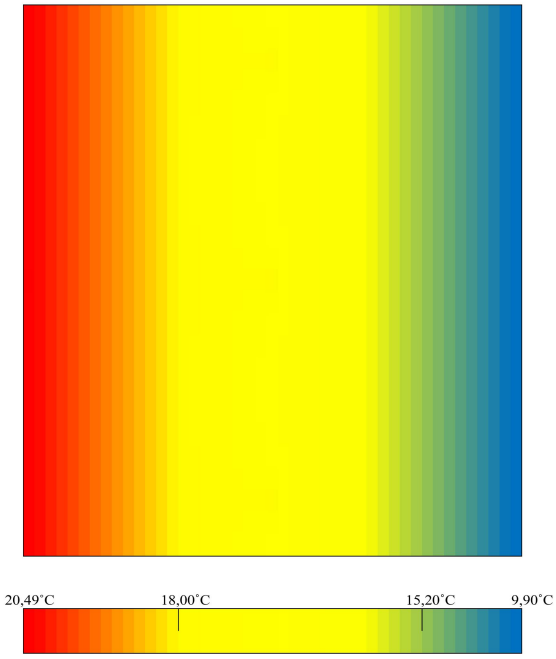
Rys. 4.5. Schemat pola temperatury dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie dla stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody po okresie 5 dni przy temperaturze zasilania równej 22°C

4.4.2. Przebieg temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

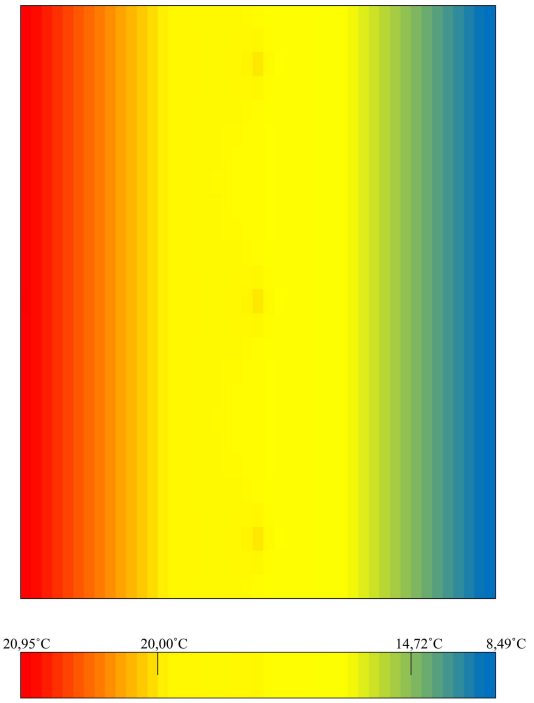
Do oceny reakcji przegrody na zmienną temperaturę zewnętrzną wykorzystano 2-dniowy przebieg tej temperatury powtarzając obliczenia 3-krotnie. Pola temperatury zilustrowano dla 147 godziny obliczeń (Rys. 4.6, Rys. 4.7, Rys. 4.8 i Rys. 4.9). W 3 przypadkach temperatura na powierzchni wewnętrznej przegrody przekroczyła 20°C: dla 18°C wyniosła 20,49°C, przy 20°C 20,95°C, a gdy temperatura zasilania wzrosła do 22°C osiągnęła wartość 21,57°C. Taki wzrost temperatury na powierzchni wewnętrznej ściany został spowodowany najniższą różnicą temperatury na obu stronach przegrody równą 8,32°C, dla pozostałych 2 wariantów wartość ta wyniosła: 10,59°C (18°C) oraz 12,46°C (20°C). W sytuacji zasilania pętli czynnikiem o temperaturze 16°C temperatura na stronie wewnętrznej wyniosła 19,94°C, a po stronie zewnętrznej 8,46°C, czyli różnica temperatur była równa 11,48°C.



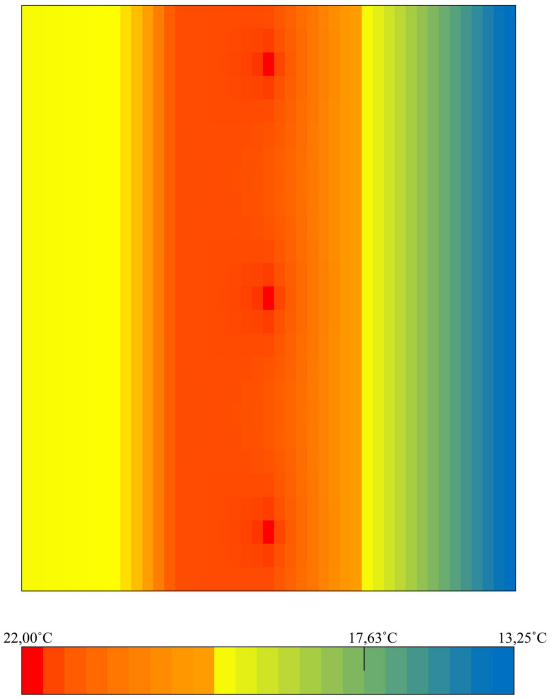
Rys. 4.6. Schemat pola temperatury dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie dla przebiegu temperatury zewnętrznej po okresie 2 dni z 3-krotnym powtórzeniem przy temperaturze zasilania równej 16°C



Rys. 4.7. Schemat pola temperatury dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie dla przebiegu temperatury zewnętrznej po okresie 2 dni z 3-krotnym powtórzeniem przy temperaturze zasilania równej 18°C



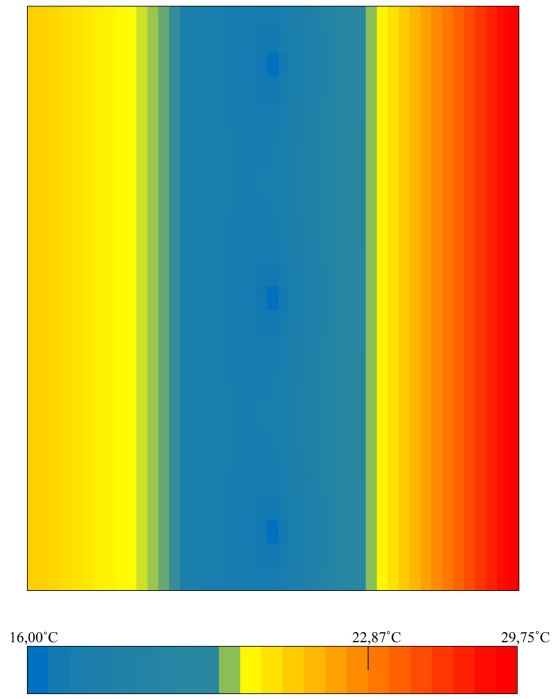
Rys. 4.8. Schemat pola temperatury dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie dla przebiegu temperatury zewnętrznej po okresie 2 dni z 3-krotnym powtórzeniem przy temperaturze zasilania równej 20°C



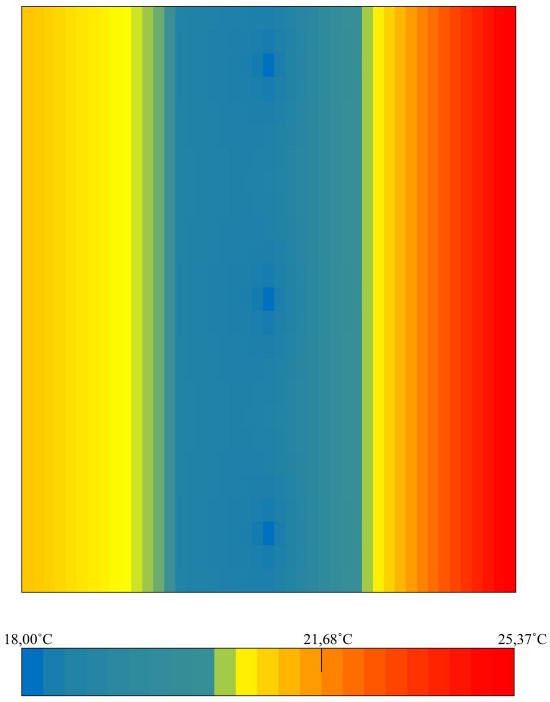
Rys. 4.9. Schemat pola temperatury dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie dla przebiegu temperatury zewnętrznej po okresie 2 dni z 3-krotnym powtórzeniem przy temperaturze zasilania równej 22°C

4.4.3. Wymuszenie skokowe temperatury zewnętrznej

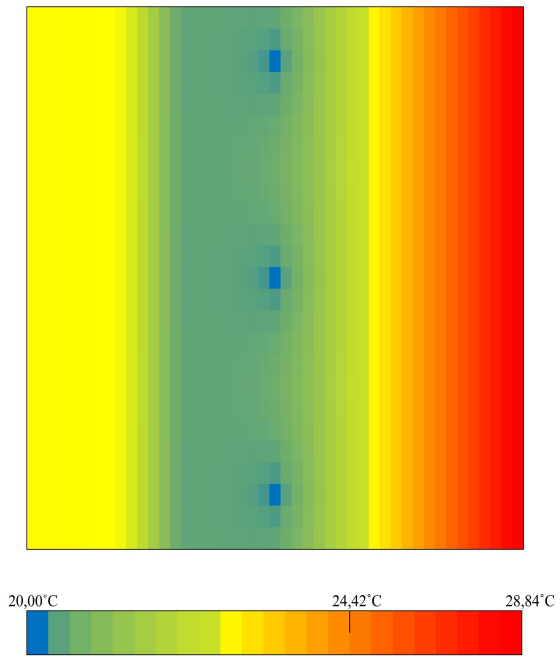
Wymuszenie skokowe temperatury zewnętrznej polegało na zmianie temperatury powietrza zewnętrznego tak aby była wyższa o co najmniej 10°C od temperatury powietrza wewnętrznego przez okres 1 dnia. Do obliczeń wykorzystano 6-krotne powtórzenie tego czasu, a pole temperatury odniesiono do 144 godziny analizy (Rys. 4.10, Rys. 4.11, Rys. 4.12 i Rys. 4.13). Dla wszystkich wariantów temperatury zasilania temperatura na powierzchni wewnętrznej przegrody osiągnęła wartości: 19,67°C dla 16°C, 20,33°C w przypadku 18°C, dla 20°C 20,35°C i 21,74°C w sytuacji 22°C. Różnica temperatury na obu powierzchniach przegrody wyniosła odpowiednio 10,08°C, 5,04°C, 8,49°C oraz 10,27°C. Dla 2 opcji temperatury zasilania: 18°C i 20°C wartość ta była niższa niż 10°C, co jest związane z przedstawieniem wyników dla ostatniej godziny analiz, czyli w momencie zakończenia eksperymentu. Godzinę wcześniej, czyli w 143 godzinie różnice te wyniosły 10,32°C (18°C) oraz 10,36°C (20°C), przy identycznej temperaturze na powierzchni wewnętrznej ściany jak w 144 godzinie.



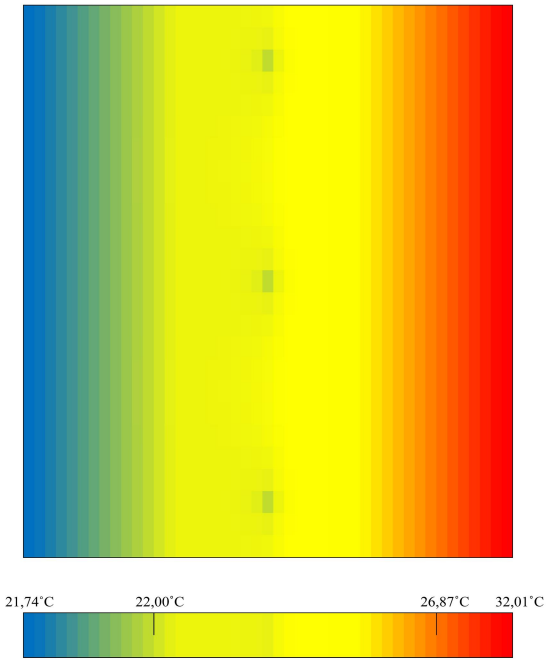
Rys. 4.10. Schemat pola temperatury dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie dla wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej po okresie 1 dnia z 6-krotnym powtórzeniem przy temperaturze zasilania równej 16°C



Rys. 4.11. Schemat pola temperatury dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie dla wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej po okresie 1 dnia z 6-krotnym powtórzeniem przy temperaturze zasilania równej 18°C



Rys. 4.12. Schemat pola temperatury dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie dla wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej po okresie 1 dnia z 6-krotnym powtórzeniem przy temperaturze zasilania równej 20°C



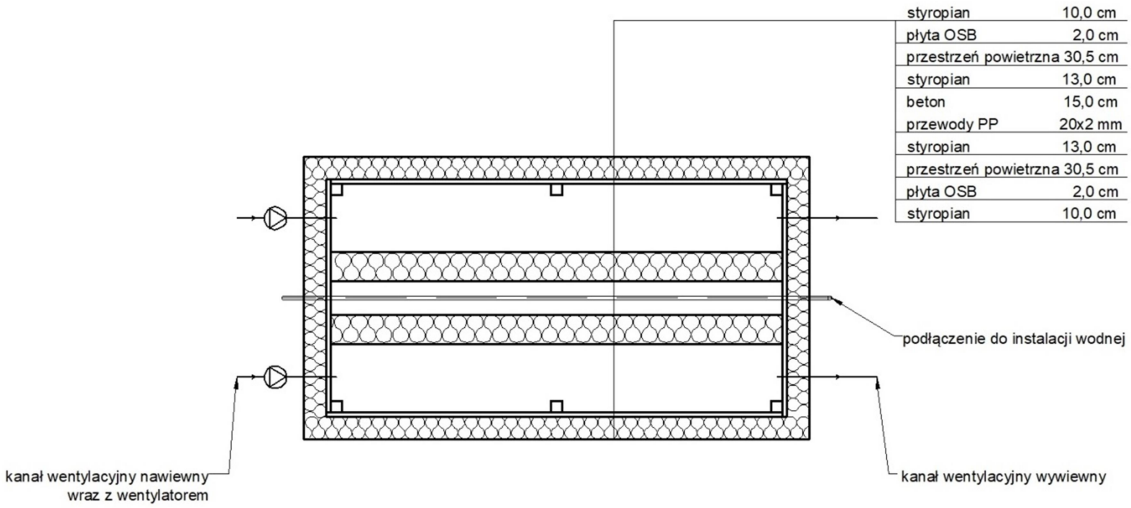
Rys. 4.13. Schemat pola temperatury dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie dla wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej po okresie 1 dnia z 6-krotnym powtórzeniem przy temperaturze zasilania równej 22°C

5. Badania eksperymentalne

W celu sprawdzenia wykonanego modelu ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie opisanym w rozdziale 4 wykonano stanowisko badawcze przegrody aktywowanej termicznie, dokładniej ściany zewnętrznej z pętlą przewodów we wnętrzu konstrukcji przegrody.

5.1. Opis stanowiska badawczego

Głównym elementem stanowiska badawczego jest betonowa ściana o grubości 15 cm z umieszczoną w jej osi symetrii pętlą polipropylenowych przewodów o średnicy 20 x 2 mm ułożonych z rozstawem 10 cm w kształt meandra. Przewody te zostały wypełniony wodą i podłączone do ultratermostatu, w którym kontrolowano temperaturę zasilania i prędkość obrotową pompy. Betonowa ściana o wysokości i długości równej 202 cm została z obu stron zaizolowana styropianem o grubości 13 cm. Całość konstrukcji zabudowano płytą OSB w ten sposób, aby przegroda aktywowana termicznie stanowiła centralną część stanowiska i pomiędzy nią a powierzchnią obudowy powstała z obu stron pustka powietrzna o szerokości 30,5 cm. Możliwość dostarczenia i usunięcia powietrza z obu przestrzeni powietrznych: wewnętrznej i zewnętrznej zapewniono dzięki montażowi kanałów wentylacyjnych wraz z wentylatorami oraz przepustnicami używanymi do odcięcia dopływu powietrza. W celu odseparowania stanowiska od posadzki hali laboratoryjnej, w której zostało ono zamontowane, podniesiono je na wysokość 10 cm nad podłogę i powstałą przestrzeń wypełniono polistyrenem ekstrudowanym XPS. Dodatkowo na całej obudowie stanowiska ułożono 10 cm warstwę styropianu izolując je tym samym od otoczenia. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na poniższym rysunku (Rys. 5.1), a jego widok rzeczywisty na zdjęciach (Rys. 5.2).



Rys. 5.1. Schemat stanowiska badawczego (opracowanie własne)

a) b) c)

Rys. 5.2. Widok rzeczywisty stanowiska eksperymentalnego (opracowanie własne)

Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano czujniki temperatury, przepływomierz oraz anemometr.

W tablicy (Tablica 5.1) zestawiono spis zamontowanych czujników temperatury wraz z nadanym symbolem, rodzajem, lokalizacją, liczbą, typem i klasą dokładności.

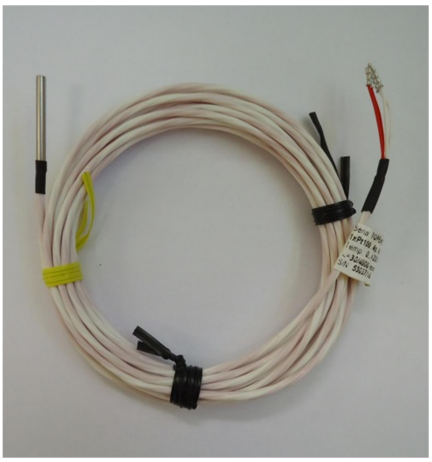
Tablica 5.1. Spis czujników temperatury wykorzystanych do przeprowadzenia badań

Symbol czujnika	Rodzaj czujnika	Lokalizacja czujnika	Liczba czujników	Seria	Krotność i rodzaj rezystora termometrycznego	Klasa dokładności czujnika
B_W	czujnik temperatury rezystancyjny	na powierzchni betonu od strony przestrzeni powietrznej wewnętrznej	20	TOPE610	1xPt100	1/3B
B_Z	czujnik temperatury rezystancyjny	na powierzchni betonu od strony przestrzeni powietrznej zewnętrznej	20	TOPE610	1xPt100	1/3B
P	czujnik temperatury rezystancyjny	na powierzchni przewodu (pętli) zabetonowanego wewnątrz konstrukcji ściany	26	TOPE412	1xPt100	1/10B
S_W	czujnik temperatury rezystancyjny	na powierzchni styropianu od strony przestrzeni powietrznej wewnętrznej	5	TOPE610	1xPt100	1/3B
S_Z	czujnik temperatury rezystancyjny	na powierzchni styropianu od strony przestrzeni powietrznej zewnętrznej	5	TOPE610	1xPt100	A
ZAS	czujnik temperatury rezystancyjny	na zasilaniu pętli grzejnej	1	TOPE412	1xPt100	A
POWR	czujnik temperatury rezystancyjny	na powrocie pętli grzejnej	1	TOPE412	1xPt100	A
POW_W_1	czujnik temperatury rezystancyjny	w przestrzeni powietrznej wewnętrznej	1	TOPE412	1xPt100	A

Tablica 5.1. c.d. Spis czujników temperatury wykorzystanych do przeprowadzenia badań

Symbol czujnika	Rodzaj czujnika	Lokalizacja czujnika	Liczba czujników	Seria	Krotność i rodzaj rezystora termometrycznego	Klasa dokładności czujnika
POW_W_2	czujnik temperatury rezystancyjny	w przestrzeni powietrznej wewnętrznej	1	TOPE412	1xPt100	A
POW_Z_1	czujnik temperatury rezystancyjny	w przestrzeni powietrznej zewnętrznej	1	TOPE412	1xPt100	A
POW_Z_2	czujnik temperatury rezystancyjny	w przestrzeni powietrznej zewnętrznej	1	TOPE412	1xPt100	A
WENT_WLO_W	czujnik temperatury rezystancyjny	wewnątrz kanału nawiewnego do przestrzeni powietrznej wewnętrznej	1	TOPE412	1xPt100	A
WENT_WLO_Z	czujnik temperatury rezystancyjny	wewnątrz kanału nawiewnego do przestrzeni powietrznej zewnętrznej	1	TOPE412	1xPt100	A
WENT_WYL_W	czujnik temperatury rezystancyjny	wewnątrz kanału wywiewnego z przestrzeni powietrznej wewnętrznej	1	TOPE412	1xPt100	A
WENT_WYL_Z	czujnik temperatury rezystancyjny	wewnątrz kanału wywiewnego z przestrzeni powietrznej zewnętrznej	1	TOPE412	1xPt100	A

Czujniki rezystancyjne kablowe w cienkościennej rurce ochronnej wykonanej ze stali kwasoodpornej typ TOPE412 producenta TERMOAPARATURA zamontowano na powierzchni przewodu (pętli) zabetonowanego wewnątrz konstrukcji ściany (Rys. 5.3). Czujniki rezystancyjne kablowe z rezystorem w teflonowej koszulce termokurczliwej typ TOPE610 producenta TERMOAPARATURA umieszczono na powierzchni betonu oraz styropianu (Rys. 5.4).



Rys. 5.3. Czujnik rezystancyjny kablowy typ TOPE412 producenta TERMOAPARATURA (opracowanie własne)

Rys. 5.4. Czujnik rezystancyjny kablowy typ TOPE610 producenta TERMOAPARATURA (opracowanie własne)

W kwestii zamontowanego przepływomierza firmy AHLBORN typ FVA915VTHM o zakresie pomiarowym od 2 do 40 l/min i dokładności pomiarów ± 1% użyto go do rejestrowania zmienności przepływu, gdyż pomiar przepływu mierzono metoda wagową (Rys. 5.5).

Anemometr producenta VOLTCRAFT o numerze PL-135HAN o zakresie pomiarowym 0,1 – 25 m/s, rozdzielczości 0,01 m/s oraz dokładności ± 5% wyświetlanej wartości posłużył do sprawdzania prędkości przepływu wewnątrz kanałów wentylacyjnych (Rys. 5.6).

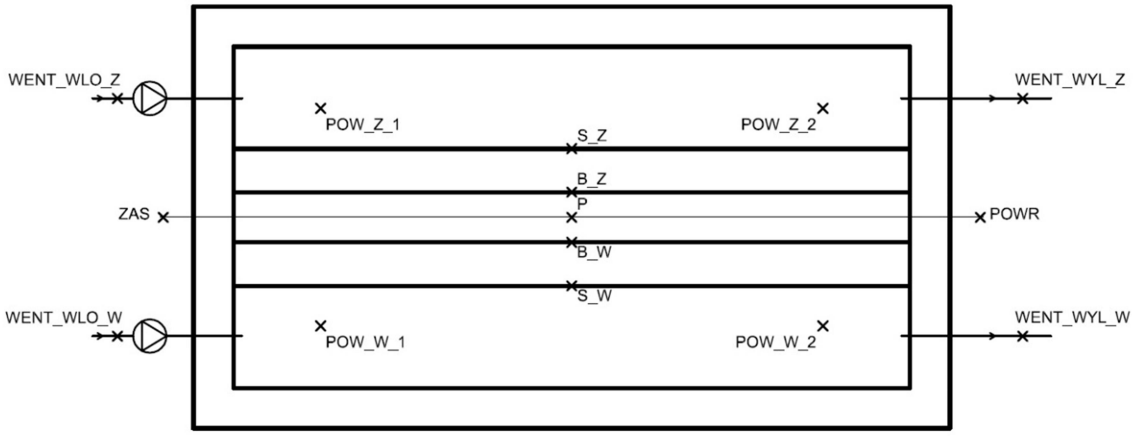
Dodatkowo na potrzeby monitorowania ewentualnej zmiany przepływu w kanale nawiewnym strefy zewnętrznej zainstalowano termoanemometr firmy AHLBORN typ FVA935TH5K2 dla przepływu powietrza o zakresie pomiarowym od 0,2 do 20 m/s, rozdzielczości 0,01 m/s oraz dokładności ± 0,2 m/s + 2% zmierzonej wartości, a dla pomiaru temperatury o zakresie -20 – 70°C, rozdzielczości 0,1°C oraz dokładności ± 0,7°C (Rys. 5.7).

Rys. 5.5. Przepływomierz typ FVA915VTHM firmy AHLBORN (opracowanie własne)

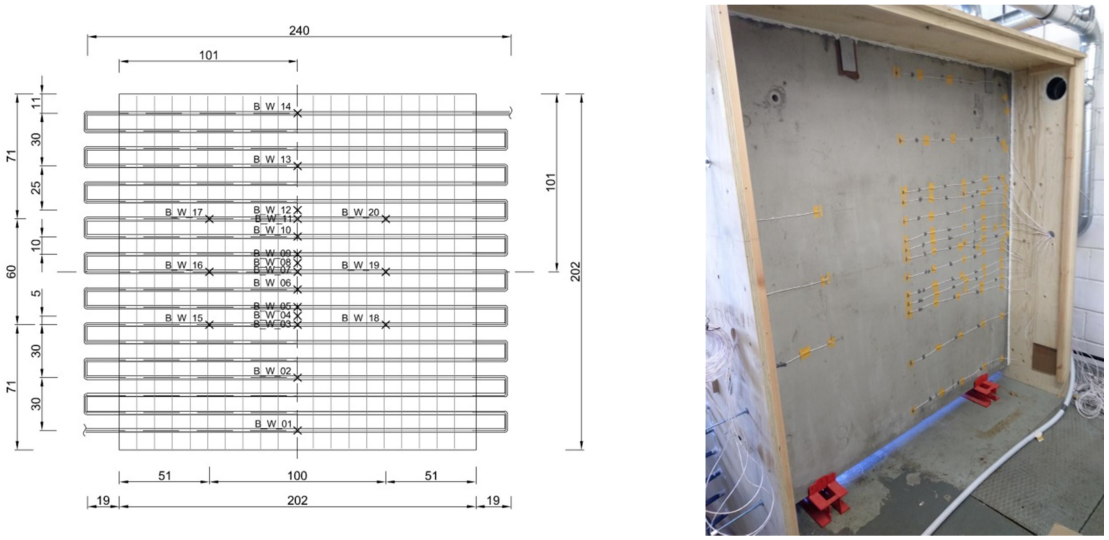
Rys. 5.6. Anemometr numer PL-135HAN producenta VOLTCRAFT (opracowanie własne)

Rys. 5.7. Termoanemometr typ FVA935TH5K2 firmy AHLBORN (opracowanie własne)

Na poniższym rysunku (Rys. 5.8) przedstawiono ogólne rozmieszczenie czujników w stanowisku eksperymentalnym, natomiast szczegółową lokalizację punktów pomiarowych przegrody aktywowanej termicznie na rysunkach Rys. 5.9 – Rys. 5.13. O miejscu zamontowania konkretnego czujnika zadecydował przeprowadzony pomiar wartości odchyłki opisany w podrozdziale 5.2.

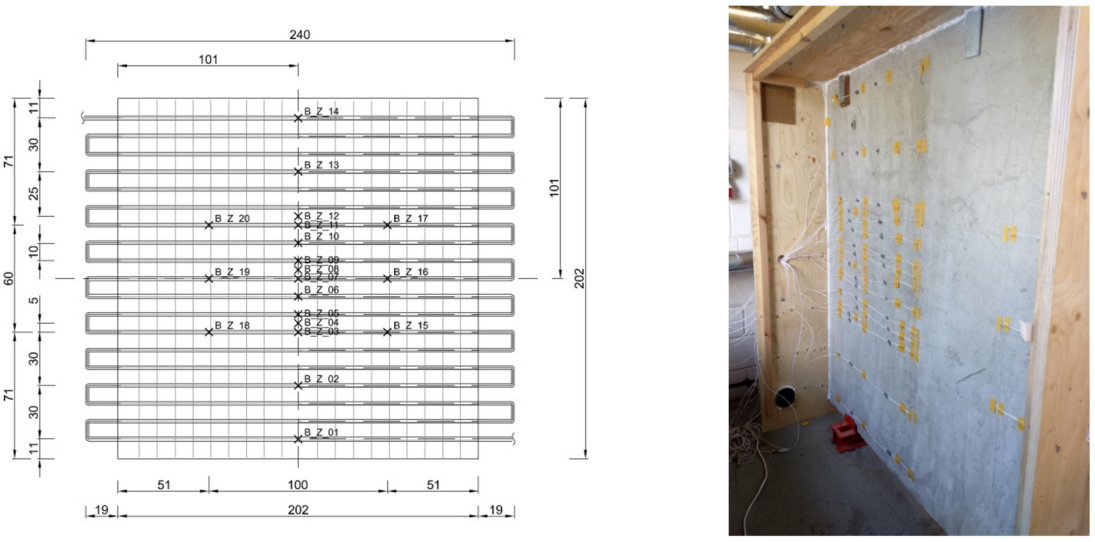


Rys. 5.8. Ogólne rozmieszczenie czujników w stanowisku badawczym *(opis oznaczeń zgodnie z Tablicą 5.1)* (opracowanie własne)



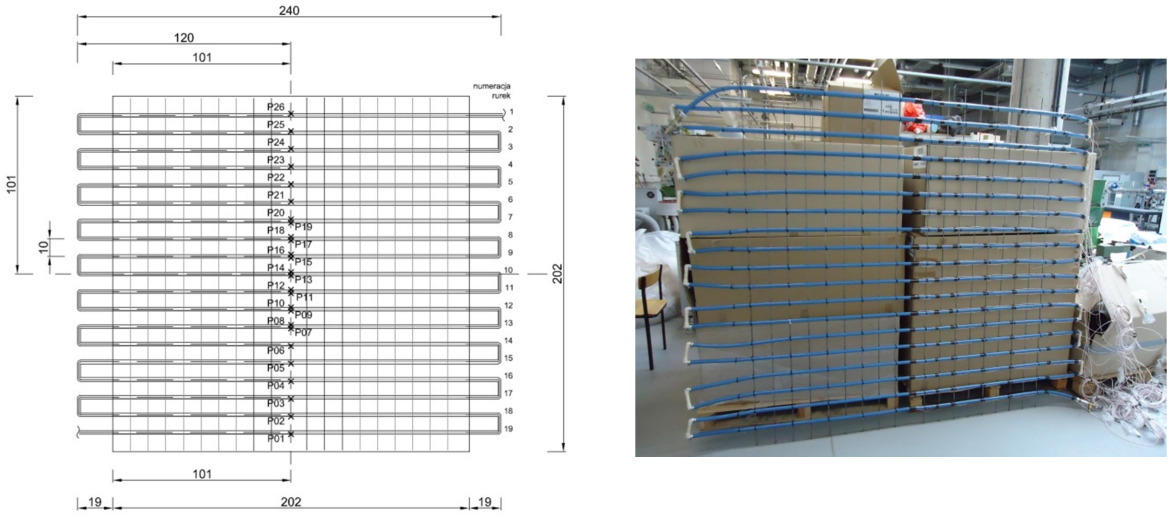
a) b)

Rys. 5.9. Szczegółowe rozmieszczenie czujników B_W na powierzchni betonu od strony przestrzeni powietrznej wewnętrznej a) projekt b) efekt końcowy (opracowanie własne)



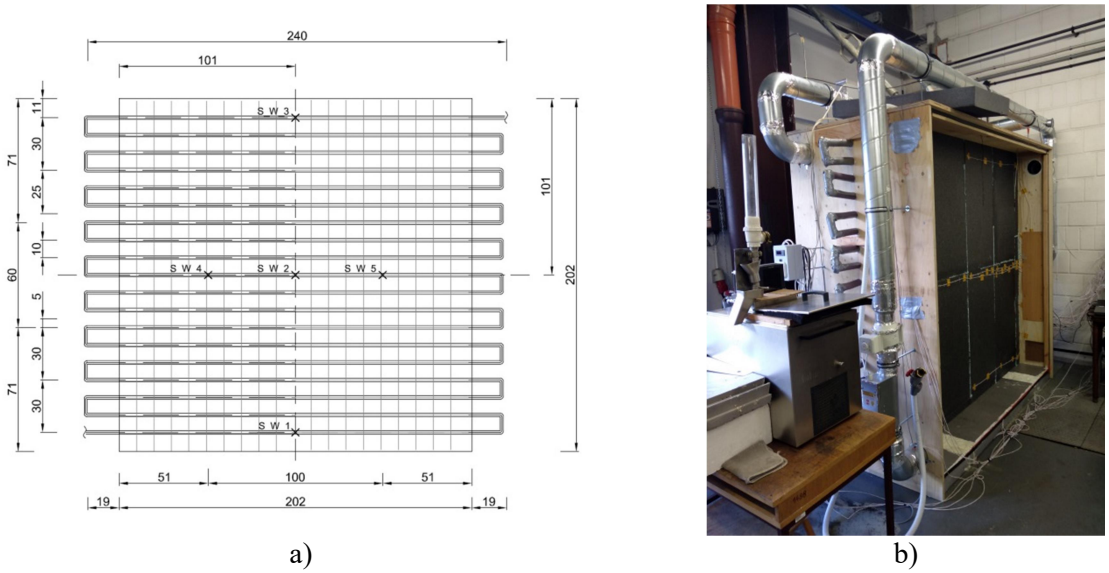
a) b)

Rys. 5.10. Szczegółowe rozmieszczenie czujników B_Z na powierzchni betonu od strony przestrzeni powietrznej zewnętrznej a) projekt b) efekt końcowy (opracowanie własne)



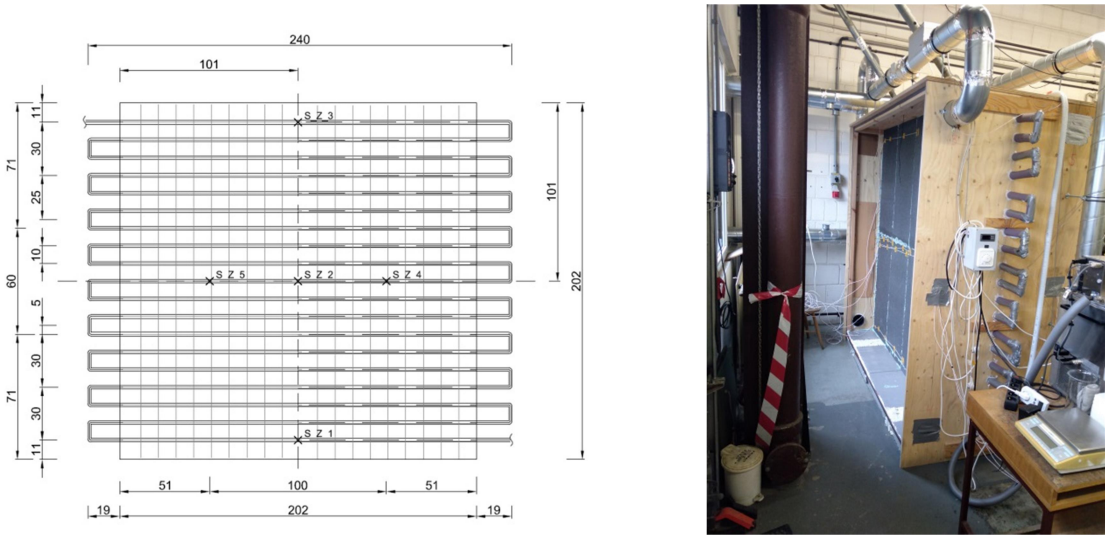
a) b)

Rys. 5.11. Szczegółowe rozmieszczenie czujników P na powierzchni przewodu (pętli) zabetonowanego wewnątrz konstrukcji ściany a) projekt b) efekt końcowy (opracowanie własne)



a) b)

Rys. 5.12. Szczegółowe rozmieszczenie czujników S_W na powierzchni styropianu od strony przestrzeni powietrznej wewnętrznej a) projekt b) efekt końcowy (opracowanie własne)



a) b)

Rys. 5.13. Szczegółowe rozmieszczenie czujników S_Z na powierzchni styropianu od strony przestrzeni powietrznej zewnętrznej a) projekt b) efekt końcowy (opracowanie własne)

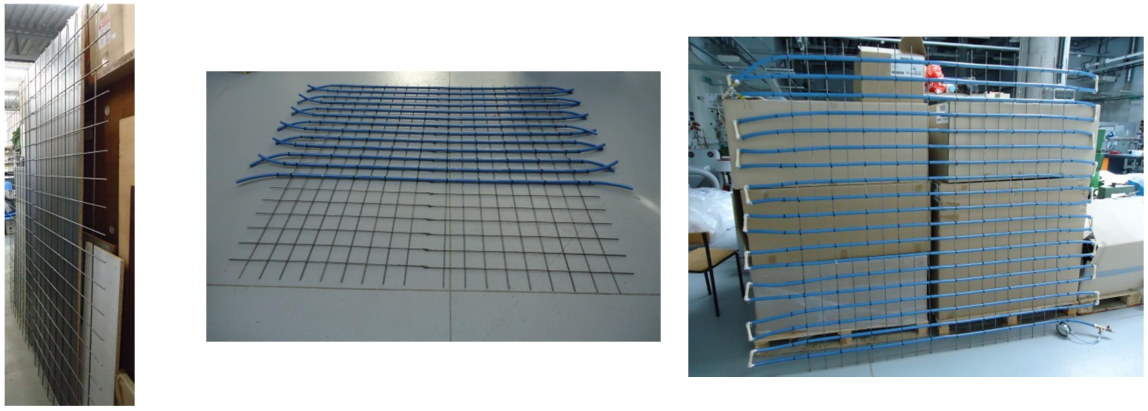
Do zapisu danych pomiarowych służyły 2 rejestratory ALMEMO 5690 firmy AHLBORN (Rys. 5.14).

a) b)

Rys. 5.14. Rejestratory ALMEMO 5690 firmy AHLBORN (opracowanie własne)

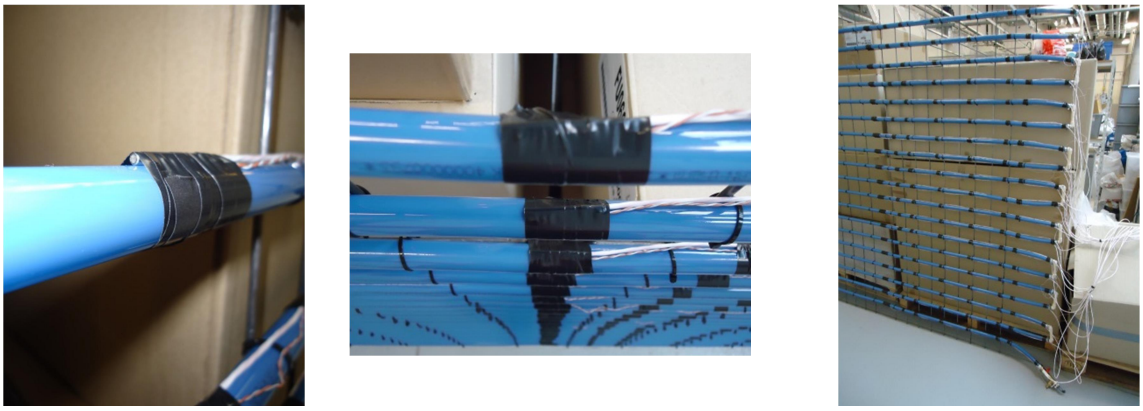
Szczegółowe etapy prac nad przygotowaniem stanowiska badawczego przedstawiono na poniższych zdjęciach: Rys. 5.15 – Rys. 5.27.

Na początku przygotowano siatkę stalową i ułożono na niej przewody tworzywowe połączone ze sobą za pomocą kolanek (Rys. 5.15). Następna część dotycząca montażu czujników na powierzchni przewodu (pętli) została zobrazowana na zdjęciach: Rys. 5.16.



a) b) c)

Rys. 5.15. Przygotowanie siatki stalowej wraz z ułożeniem na niej przewodów (opracowanie własne)



a) b) c)

Rys. 5.16. Montaż czujników na powierzchni przewodu (pętli) (opracowanie własne)

Prace budowlane polegające na wykonaniu deskowania (Rys. 5.17), wylaniu ściany (Rys. 5.18), przewiezienia jej na teren Politechniki Poznańskiej (Rys. 5.19) i montażu ściany w hali laboratoryjnej (Rys. 5.20) oraz wykonaniu obudowy stanowiska (Rys. 5.21) zostały przeprowadzone przez firmę PERI Polska – Oddział Poznań wraz z firmą Intech Sp. z o.o..

a) b)

Rys. 5.17. Deskowanie ściany (opracowanie własne)

Rys. 5.18. Wylanie ściany (opracowanie własne)

a)

b)

Rys. 5.19. Przewiezienie ściany (opracowanie własne)

a)

b)

Rys. 5.20. Montaż ściany (opracowanie własne)

a)

b)

c)

Rys. 5.21. Wykonanie obudowy stanowiska (opracowanie własne)

Kolejną fazę działań składającą się z mocowania czujników na powierzchni betonu oraz zaizolowaniu przestrzeni między stanowiskiem a posadzką hali, przedstawiono na poniższych zdjęciach: Rys. 5.22. Następnie zamontowano instalację wentylacyjną (Rys. 5.23) i podłączono pętlę do ultratermostatu (Rys. 5.24) oraz 88 czujników do rejestratorów (Rys. 5.25).

a) b)

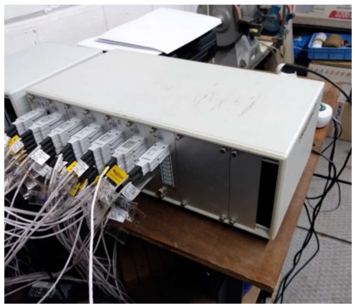
Rys. 5.22. Montaż czujników na powierzchni betonu oraz zaizolowanie przestrzeni między stanowiskiem a posadzką hali od strony przestrzeni powietrznej a) wewnętrznej b) zewnętrznej (opracowanie własne)

a) b) c)

Rys. 5.23. Montaż instalacji wentylacyjnej (opracowanie własne)

Rys. 5.24. Podłączenie pętli do ultratermostatu (opracowanie własne)

a)



b)

Rys. 5.25. Podłączenie czujników do rejestratorów (opracowanie własne)

Ostatni etap prac związany był z zaizolowaniem ściany betonowej, następnie z umieszczeniem na jej powierzchni czujników (Rys. 5.26), a na koniec montażem izolacji na obudowie stanowiska (Rys. 5.27).

a)

b)

Rys. 5.26. Zaizolowanie ściany betonowej wraz z umieszczeniem na jej powierzchni czujników od strony przestrzeni powietrznej a) wewnętrznej b) zewnętrznej (opracowanie własne)

Rys. 5.27. Montaż izolacji na obudowie stanowiska (opracowanie własne)

Jako izolację wykorzystano produkty firmy Termo Organika Sp. z o.o.: na posadzce hali laboratoryjnej ułożono płyty z polistyrenu ekstrudowanego o grubości 10 cm, na powierzchni przegrody betonowej styropian TERMONIUM PLUS fasada o grubości 13 cm, na ścianach obudowy stanowiska styropian tego samego typu, ale o grubości 10 cm, natomiast na dachu obudowy stanowiska styropian TERMONIUM parking o grubości 10 cm.

5.2. Wyznaczenie odchyłek czujników temperatury

Do wykonania pomiarów odchyłek czujników temperatury zamontowanych wewnątrz i na powierzchni zaizolowanej betonowej ściany z pętlą grzejną wykorzystano kalibrator producenta EUROLEC INSTRUMENTATION Ltd. typ CS175 o dokładności ± 0,05°C i rozdzielczości 0,01°C (Rys. 5.28), o takiej samej rozdzielczości rejestrator ALMEMO 2590 firmy AHLBORN (Rys. 5.29) oraz posiadający świadectwo wzorcowania termometr elektroniczny P795 firmy DOSTMANN electronic z czujnikiem Pt100 o dokładności ± 0,015°C i rozdzielczości 0,001°C (Rys. 5.30). Sposób przeprowadzenia pomiarów polegał na umieszczeniu w kalibratorze, przy określonej jego nastawie temperatury, termometru elektronicznego będącego przyrządem wzorcowym oraz badanego czujnika temperatury (Rys. 5.31 – Rys. 5.33). Odchyłka była zatem różnicą wskazań między termometrem wzorcowym, a czujnikiem poddanym analizom i zilustrowano ją na poniższych wykresach (Rys. 5.34 – Rys. 5.38).

Rys. 5.28. Kalibrator typ CS175 producenta EUROLEC INSTRUMENTATION Ltd. (opracowanie własne)

Rys. 5.29. Rejestrator ALMEMO firmy AHLBORN (opracowanie własne)

a) b)

Rys. 5.30. Termometr elektroniczny P795 firmy DOSTMANN electronic (opracowanie własne)

Rys. 5.31. Czujnik TOPE412 połączony z wtyczką ALMEMO (opracowanie własne)

Rys. 5.32. Czujnik TOPE610 połączony z wtyczką ALMEMO (opracowanie własne)

a) b)

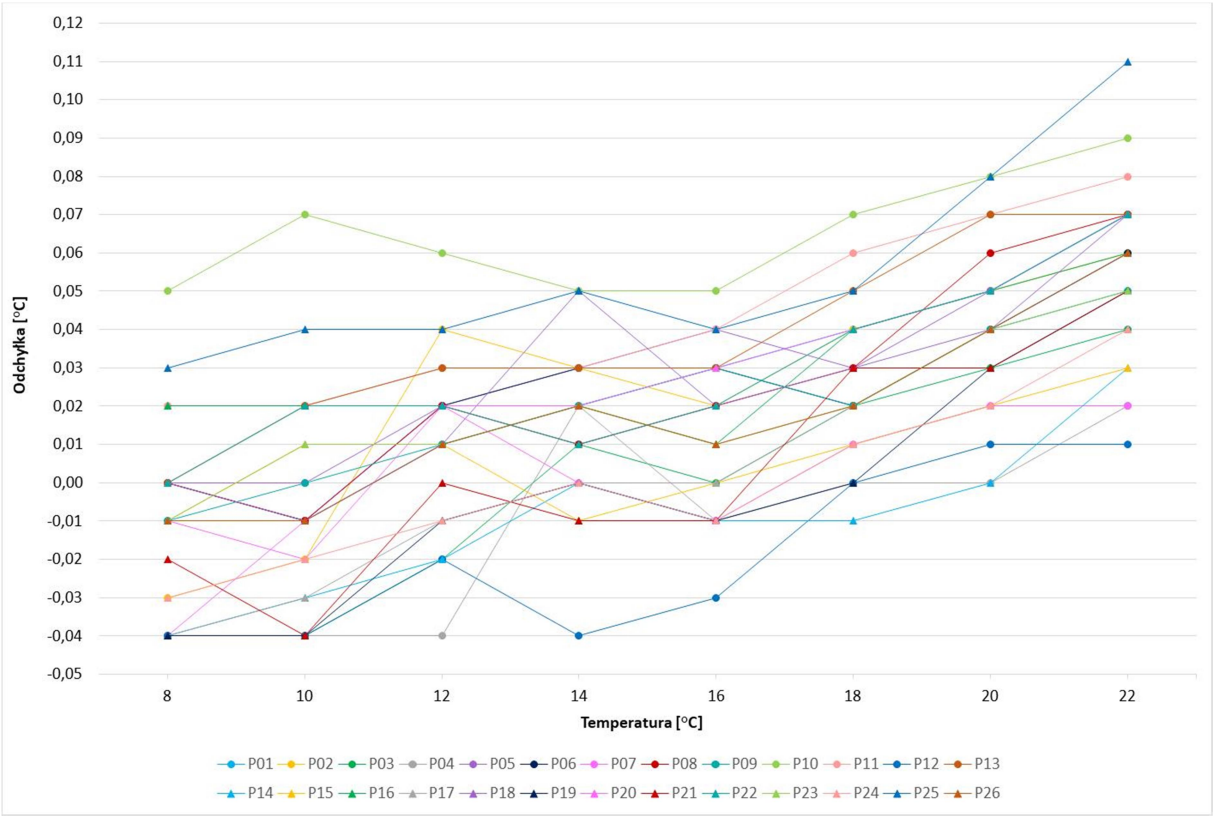
Rys. 5.33. Przeprowadzenie pomiaru odchyłek dla czujników temperatury (opracowanie własne)

Dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów zabetonowanych wewnątrz ściany odchyłki zostały wyznaczone dla zakresu temperatur 8°C – 22°C co 2°C i osiągnęły

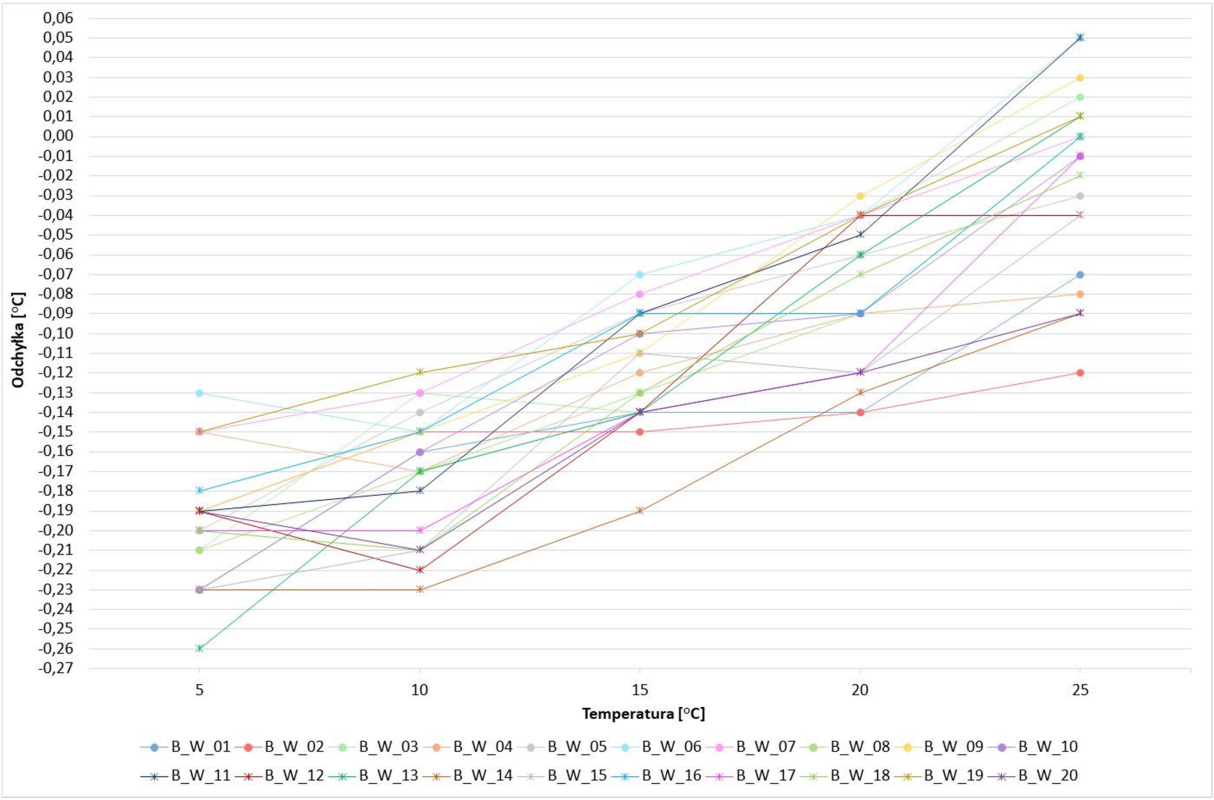
wartości od -0,04°C do 0,11°C (Rys. 5.34). Maksymalna wartość, czyli licząca 0,11°C dotyczyła czujnika P25 przy nastawie 22°C. Minimalną różnicę równą 0°C zanotowano dla czujników: P03 (dla 16°C), P04 (dla 18°C i 20°C), P05 (dla 8°C i 10°C), P06 (dla 8°C), P07 (dla 14°C), P09 (dla 10°C), P12 (dla 18°C), P13 (dla 8°C), P14 (dla 14°C i 20°C), P15 (dla 16°C), P17 (dla 14°C i 16°C), P19 (dla 14°C i 18°C), P21 (dla 12°C), P22 (dla 8°C) oraz P24 (dla 14°C). Odchyłki wynoszące wartości na poziomie ± 0,01°C, czyli identyczne z rozdzielczością rejestratora, zanotowano dla czujników przy nastawach: 8°C – P01, P09, P15, P23, P20 i P26; 10°C – P01, P06, P07, P08, P15, P18, P23 i P26; 12°C – P01, P09, P15, P17, P18, P19, P23, P24 i P26; 14°C – P03, P08, P15, P21 i P22; 16°C – P04, P07, P14, P16, P19, P21, P23, P24 i P26; 18°C – P07, P14, P15 i P24; oraz 20°C i 22°C – P12. W przypadku danych producenta błąd bezwzględny został podany dla temperatury 100°C. Dla czujników o klasie dokładności 1/10B, czyli umieszczonych na powierzchni pętli wartość maksymalna wyniosła wówczas -0,09°C i odnosiła się do czujników P05, natomiast minimalna wartość 0,01°C dla czujnika P24. Wyniki producenta nie zostały porównane z własnymi badaniami z powodu ograniczonego zakresu temperatury kalibratora do +85°C.

W kwestii czujników zamontowanych na powierzchni betonu i na powierzchni styropianu od strony przestrzeni powietrznej wewnętrznej posiadających klasę dokładności 1/3B zgodnie z dokumentacją jakościową producenta, czyli dla 100°C najwyższy błąd bezwzględny na poziomie odnosił się w przypadku grupy czujników B_W do wartości -0,14°C dla czujnika B_W_01 oraz 0,14°C dla B_W_11, dla czujników B_Z do wartości 0,15°C (B_Z_16), dla grupy S_W do poziomu -0,14°C dla czujnika S_W_1. Najniższe wartości wyniosły dla danych czujników: -0,02°C (B_W_08) i 0,02°C (B_W_07 i B_W_13) oraz identyczna wartość 0,02°C dla czujników B_Z_11 i B_Z_19, natomiast dla czujników S_W wartość -0,04°C (S_W_5). Wartości odchyłek są niższe od wartości ± 0,27°C podanej w normie [74] dla rezystorów platynowych o klasie dokładności 1/3B dla temperatury równej 100°C. Własne pomiary przeprowadzono dla nastawy: 5°C, 10°C, 15°C, 20°C i 25°C, czyli dla warunków, które wystąpią w przegrodzie. Dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu od strony przestrzeni powietrznej wewnętrznej o symbolu B_W odchyłki mieściły się w zakresie -0,26°C – 0,05°C (Rys. 5.35). Wartość maksymalna dotyczyła czujnika B_W_13 przy nastawie równej 5°C. Wartości minimalne równe 0°C zaobserwowano przy nastawie 25°C (B_W_07, B_W_08 i B_W_16), a sięgające ± 0,01°C również dla tej samej nastawy i dla czujników: B_W_10 (-0,01°C), B_W_13 (0,01°C), B_W_17 (-0,01°C) oraz B_W_19 (0,01°C). W kwestii czujników zamontowanych na powierzchni betonu od strony przestrzeni powietrznej zewnętrznej (B_Z) odchyłki osiągnęły wartości od -0,22°C – 0,07°C (Rys. 5.36). Najwyższa wartość dotyczyła czujnika B_Z_17. W przypadku wartości równych 0°C odnosiły się do nastaw: 20°C (B_Z_15 i B_Z_18) oraz 25°C (B_Z_01 i B_Z_03). Wartości ± 0,01°C osiągnięto dla czujników i przy nastawach: 20°C B_Z_07 (0,01°C) i B_Z_13 (-0,01°C) oraz dla 25°C B_Z_06 (0,01°C). Ostatnia grupa czujników o klasie dokładności 1/3B rozmieszczona na powierzchni styropianu od strony przestrzeni powietrznej wewnętrznej (S_W) charakteryzowała się odchyłkami w zakresie -0,31°C – -0,03°C (Rys. 5.37). Wartość największa dotyczyła czujników S_W_3 i S_W_4 dla nastawy 5°C, natomiast najmniejsza wartość odchyłki czujnika S_W_5 dla 25°C.

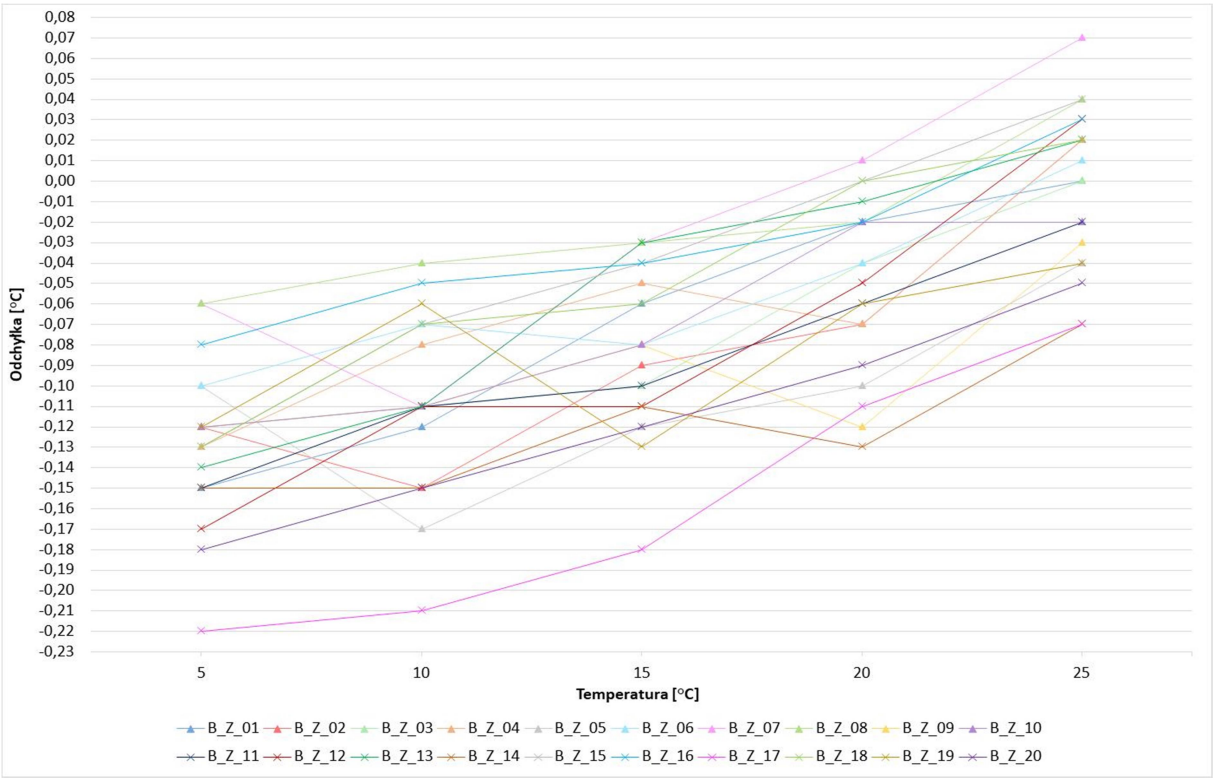
Producent jako wyniki błędu bezwzględnego dla czujników o klasie dokładności A, które zostały zamontowane na powierzchni styropianu od strony przestrzeni powietrznej zewnętrznej podał wartości od -0,13°C (czujnik S_Z_2) do -0,09°C (S_Z_4) dla 100°C. Według normy [74] dopuszczalna odchyłka dla rezystorów platynowych o klasie dokładności A dla temperatury równej 100°C powinna wynosić ± 0,35°C, czyli podane przez producenta wartości mieszczą się w zakresie. Podczas własnych badań wyznaczono odchyłki dla nastaw z przedziału -15°C – 25°C, co 5°C. Osiągnięto wartości od -0,45°C do 0,01°C (Rys. 5.38). Wartość maksymalną odchyłki zanotowano dla czujnika S_Z_5 przy -15°C, natomiast wartość minimalna równa 0°C dla czujników S_Z_1 i S_Z_5 dla 25°C. Dla nastawy 0°C zanotowano wartości równe -0,15°C, oprócz czujnika S_Z_2, gdy odchyłka wyniosła wówczas -0,14°C. Wszystkie te wartości są zgodne z normą [74], w której dopuszczalna odchyłka dla rezystorów platynowych o klasie dokładności A w 0°C powinna wynosić ± 0,15°C.



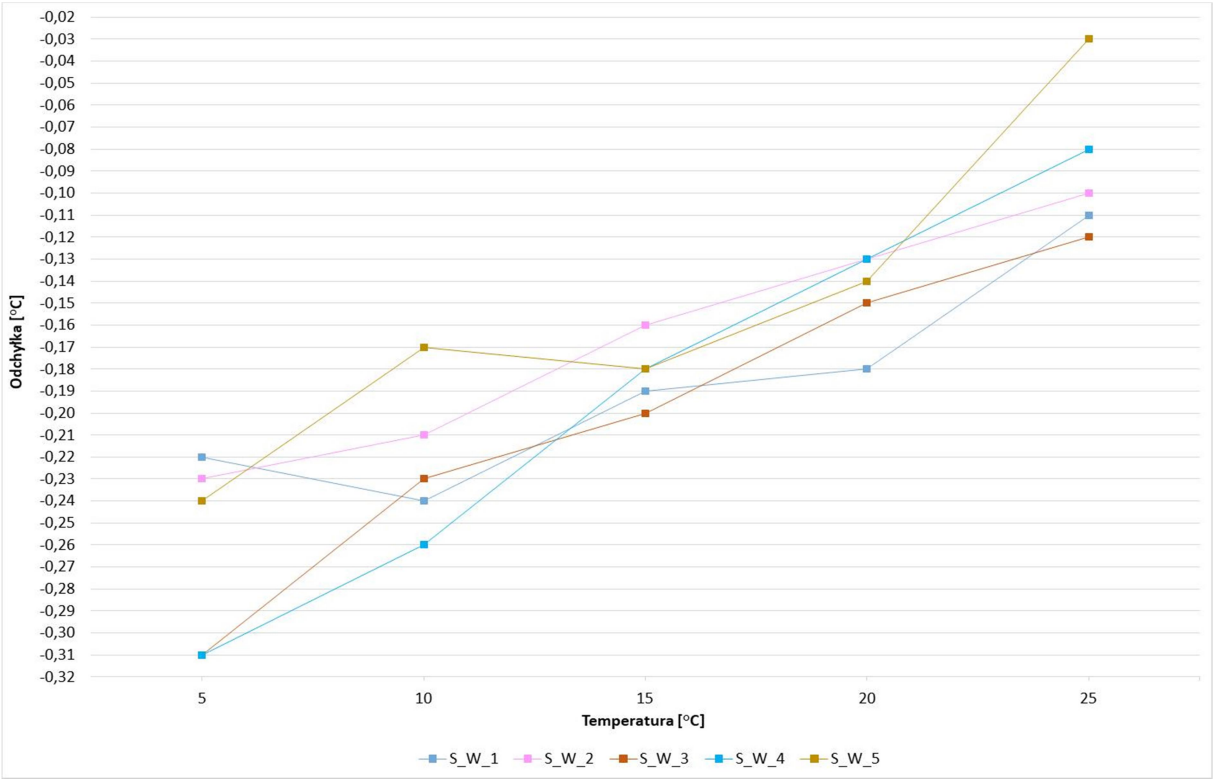
Rys. 5.34. Wartości odchyłek temperatury dla czujników P umieszczonych na powierzchni przewodu (pętli) zabetonowanego wewnątrz konstrukcji ściany



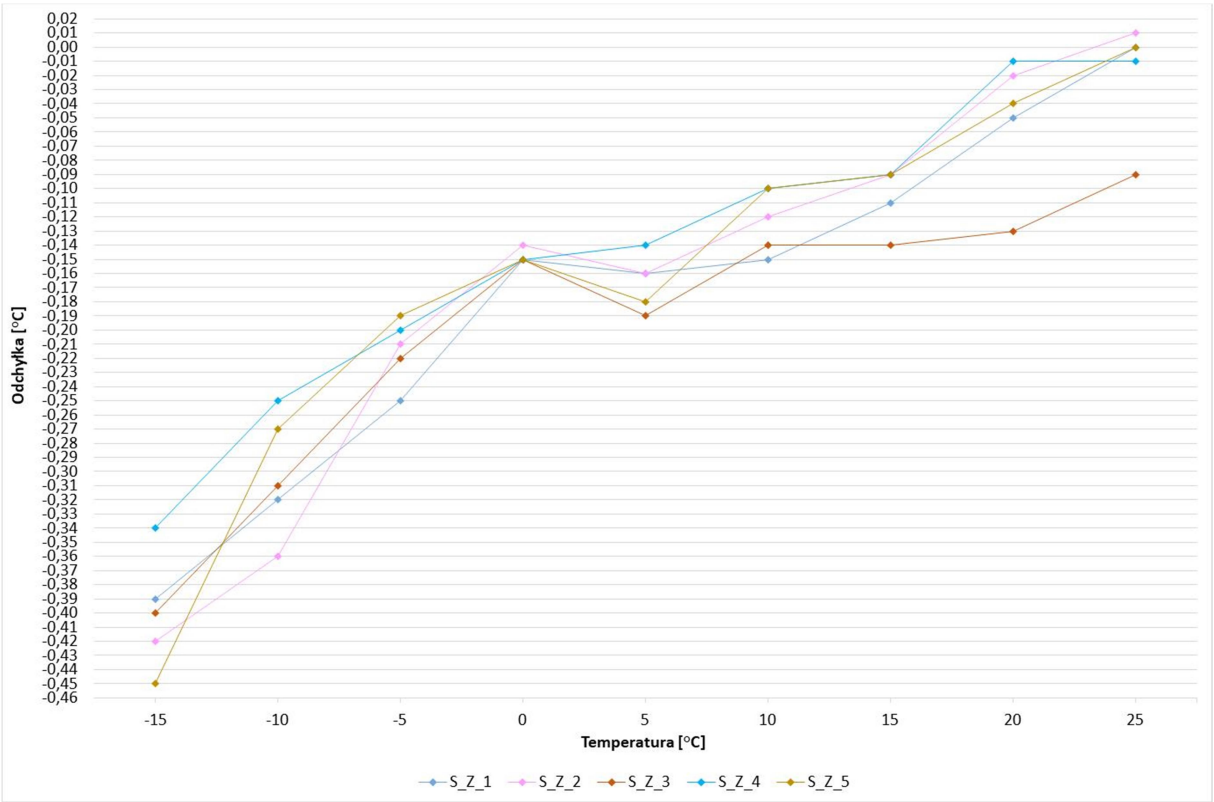
Rys. 5.35. Wartości odchyłek temperatury dla czujników B_W umieszczonych na powierzchni betonu od strony przestrzeni powietrznej wewnętrznej



Rys. 5.36. Wartości odchyłek temperatury dla czujników B_Z umieszczonych na powierzchni betonu od strony przestrzeni powietrznej zewnętrznej



Rys. 5.37. Wartości odchyłek temperatury dla czujników S_W umieszczonych na powierzchni styropianu od strony przestrzeni powietrznej wewnętrznej



Rys. 5.38. Wartości odchyłek temperatury dla czujników S_Z umieszczonych na powierzchni styropianu od strony przestrzeni powietrznej zewnętrznej

5.3. Opis przebiegu badań

Badania wykonane na stanowisku doświadczalnym składały się z 3 etapów:

- stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody,
- przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni,
- wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej.

Pierwszy etap polegał na zasilaniu przewodów (pętli) zabetonowanych wewnątrz ściany czynnikiem o stałej temperaturze i przepływie, ale bez przepływu powietrza w strefach powietrznych, aż do momentu osiągnięcia stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody. W następnym kroku po osiągnięciu stanu stabilizacji włączenie wentylatora strefy zewnętrznej i nawiewanie do przestrzeni powietrznej powietrza zewnętrznego przez okres 2 dni. W ostatnim etapie badań wentylator strefy zewnętrznej nadal pozostał włączony, natomiast przepustnice ustawiono umożliwiając cyrkulację wewnętrzną w przestrzeni powietrznej zewnętrznej. W tym etapie badań włączono nagrzewnicę, której zadaniem było podgrzanie powietrza nawiewanego do strefy zewnętrznej, tak aby osiągnąć co najmniej 10°C wzrost temperatury w tej przestrzeni powietrznej względem temperatury w strefie wewnętrznej.

Każdy z etapów badań został przeprowadzony dla 4 wartości nastawy temperatury ultratermostatu: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C.

Wskazania czujników zapisywano co 5 s. Przepływ wody przez przewody (pętlę) ustawiono jako maksymalny, a do jego pomiaru wykorzystano metodę wagową.

5.4. Opracowanie rezultatów pomiarów doświadczalnych

W poniższym podrozdziale przedstawiono wyniki pomiarów temperatury na powierzchni betonu pod warstwą styropianu w celu zobrazowania reakcji przegrody na poszczególny etap badań i podczas różnych nastaw temperatury ultratermostatu. Dodatkowo w przypadkach, gdy występował przepływ powietrza w strefach powietrznych sporządzone wykresy rozbudowano o przebieg temperatury powietrza w przestrzeniach powietrznych. Na powierzchni ściany betonowej zamontowano 40 czujników: 20 czujników B_W oraz 20 czujników B_Z dodatkowo w niektórych punktach pomiarowych temperatura osiągnęła zbliżoną wartość. W związku potrzebą zachowania czytelności w prezentowaniu rezultatów wybrano wskazania dla czujników umieszczonych w jej osi symetrii:

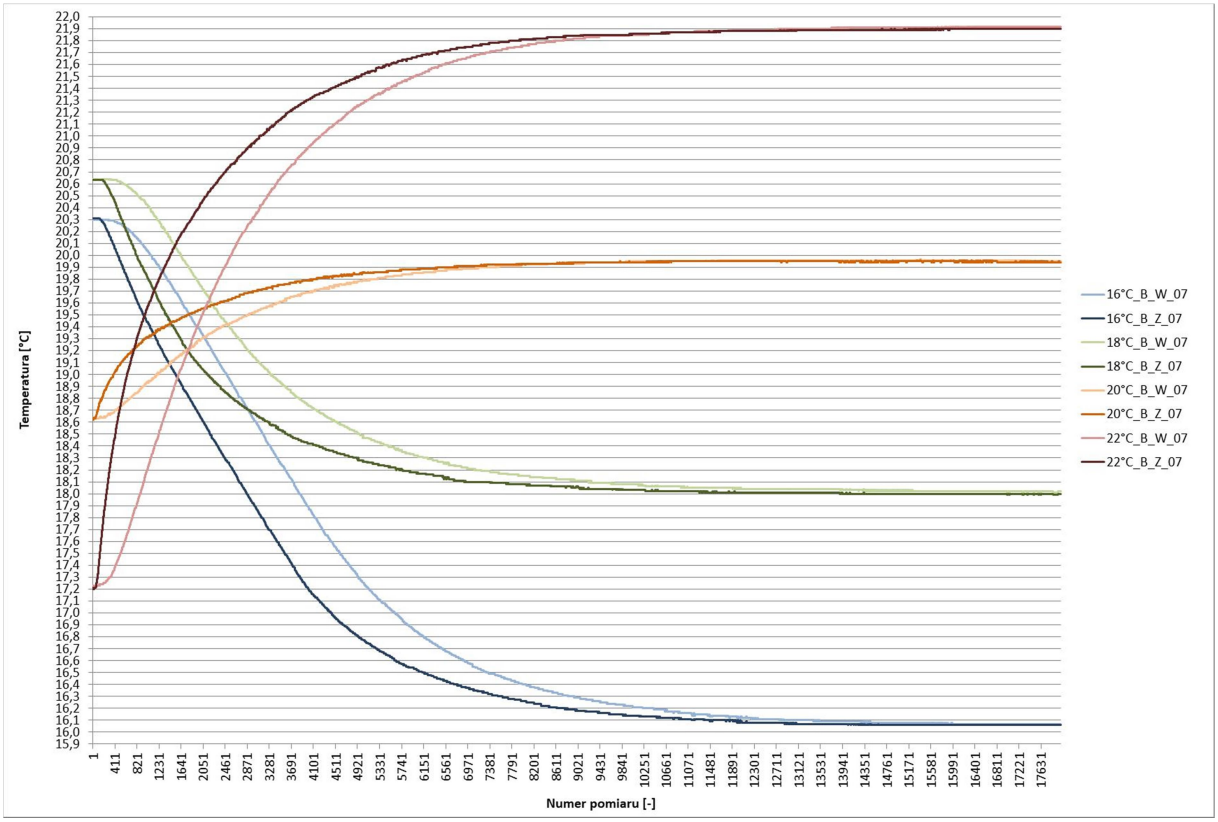
- B_W_07 i B_Z_07 – zlokalizowane w połowie wysokości ściany (centralne),
- B_W_14 i B_Z_14 – skrajne górne,
- B_W_01 i B_Z_01 – skrajne dolne,
- B_W_11 i B_Z_11 – zlokalizowane 30 cm powyżej centralnego czujnika,
- B_W_03 i B_Z_03 – zlokalizowane 30 cm poniżej centralnego czujnika.

W przypadku pomiarów przepływu metodą wagową dla serii pomiarowych otrzymano średnie wartości dla danych nastaw temperatury i etapów badań: 16°C równa 4,53 l/min dla etapu stabilizacji, 4,54 l/min dla etapu dobowego i 4,57 l/min dla wymuszenia skokowego temperatury, 4,54 l/min w przypadku etapu stabilizacji dla 18°C, 4,53 l/min dla przebiegu

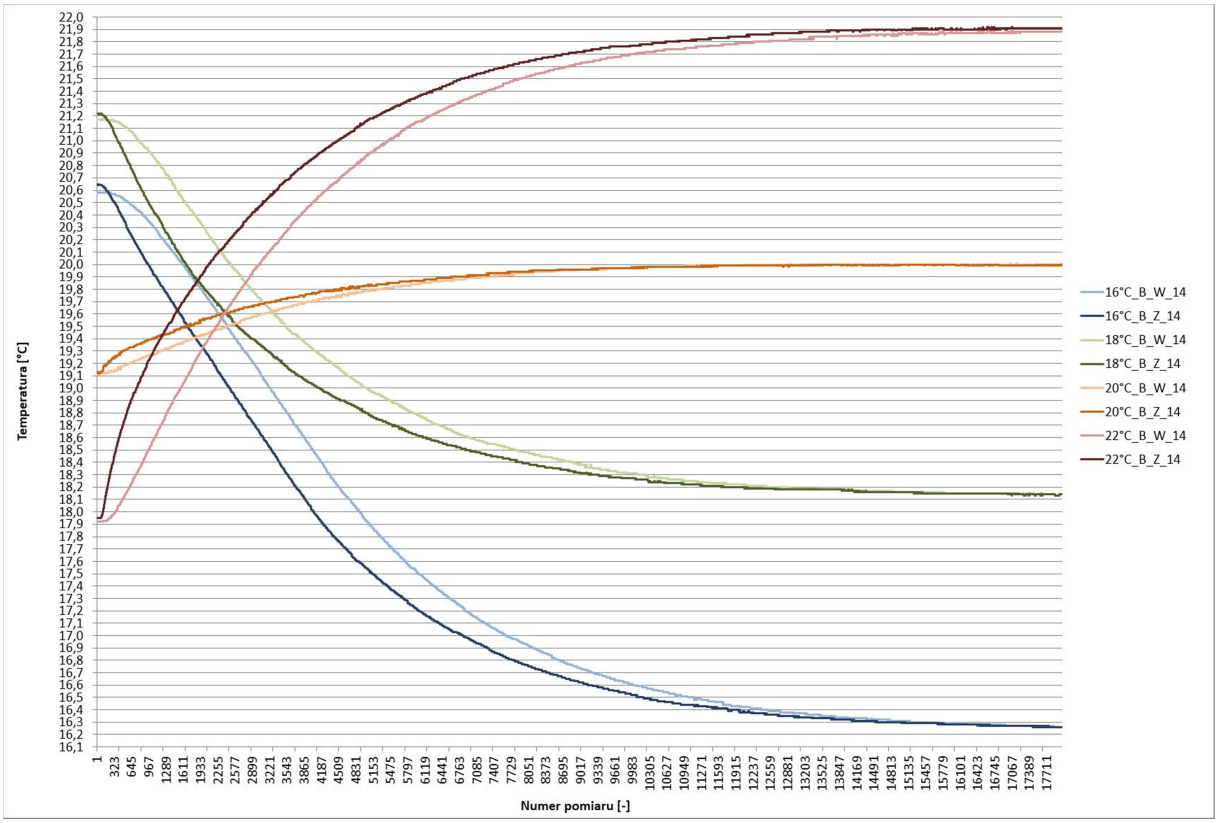
dobowego, a dla wymuszenia skokowego 4,57 l/min, dla 20°C 4,60 l/min – okres stabilizacji, 4,59 l/min – przebieg dobowy i wymuszenie skokowe temperatury, natomiast podczas 22°C wynosząca 4,59 l/min przez czas stabilizacji, 4,60 l/min dla przebiegu dobowego i wymuszenia skokowego temperatury.

5.4.1. Stabilizacja temperatury na powierzchni przegrody

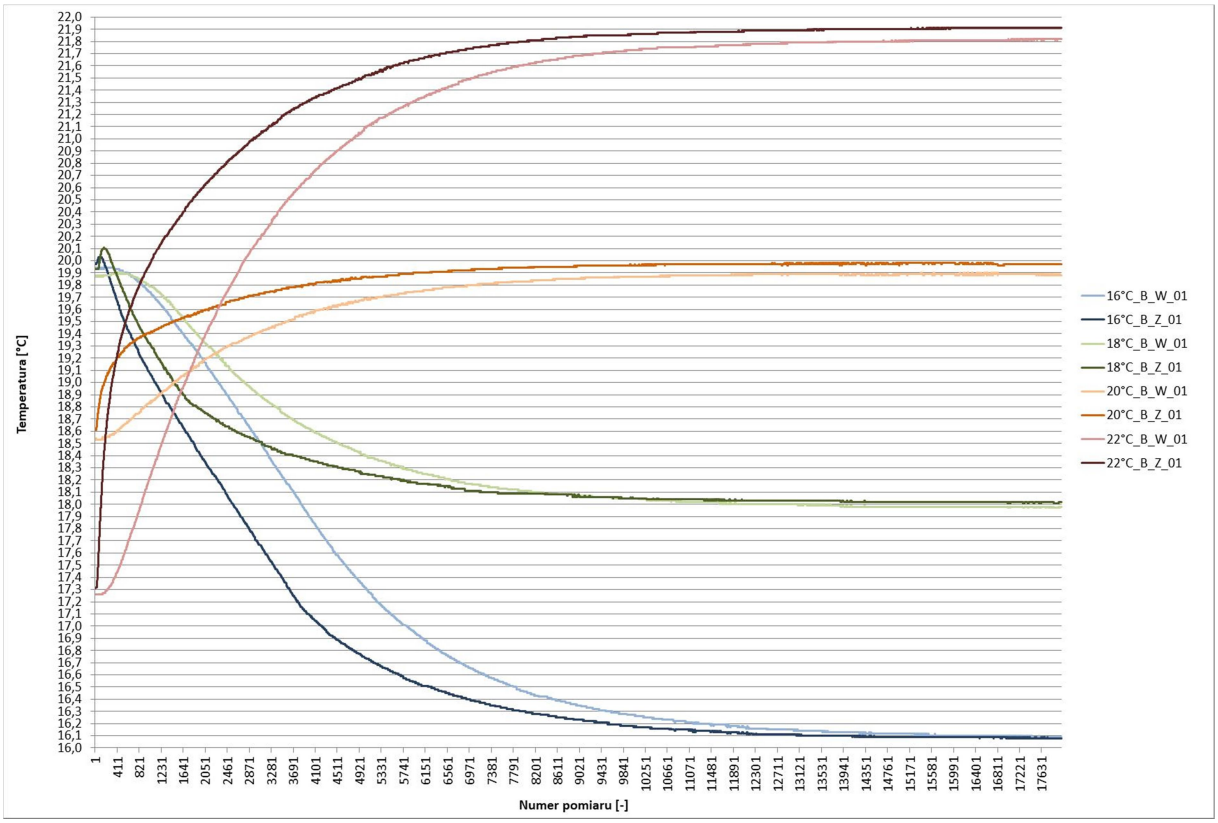
Etap stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody przedstawiono na poniższych wykresach (Rys. 5.39 – Rys. 5.43) dla okresu 25 godzin rozpoczęty od momentu włączenia ultratermostatu do uzyskania stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody. Na podstawie wykresów zauważono, że doba (pomiar o numerze 17280) jest wystarczająca do osiągnięcia stanu stabilizacji. W kwestii wskazań poszczególnych czujników to dla pary czujników umieszczonych centralnie na powierzchni przegrody (B_W_07 i B_Z_07) bez względu na nastawę temperatury ultratermostatu wartość temperatury po obu stronach ściany była do siebie zbliżona z różnicą jedynie 0,01°C bądź 0,02°C. Miejscem, w którym rozbieżność pomiędzy stroną wewnętrzną i zewnętrzną przegrody okazała się największa, to najniższy punkt pomiarowy (para czujników B_W_01 i B_Z_01), wówczas dla nastawy 20°C oraz 22°C i w obu przypadkach wyniosła -0,09°C, ta wartość jest niższa niż 0,1°C.



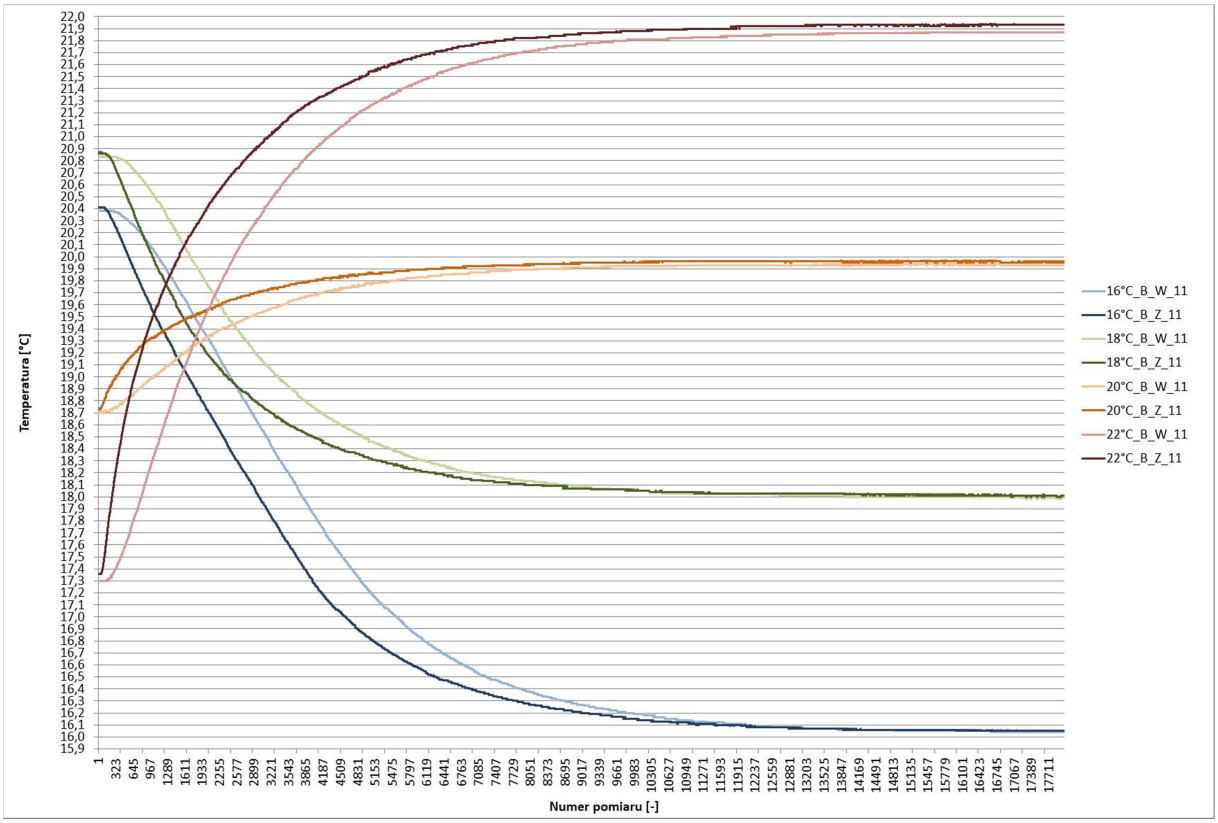
Rys. 5.39. Przebieg temperatury dla czujników B_W_07 i B_Z_07 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C do momentu uzyskania stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody



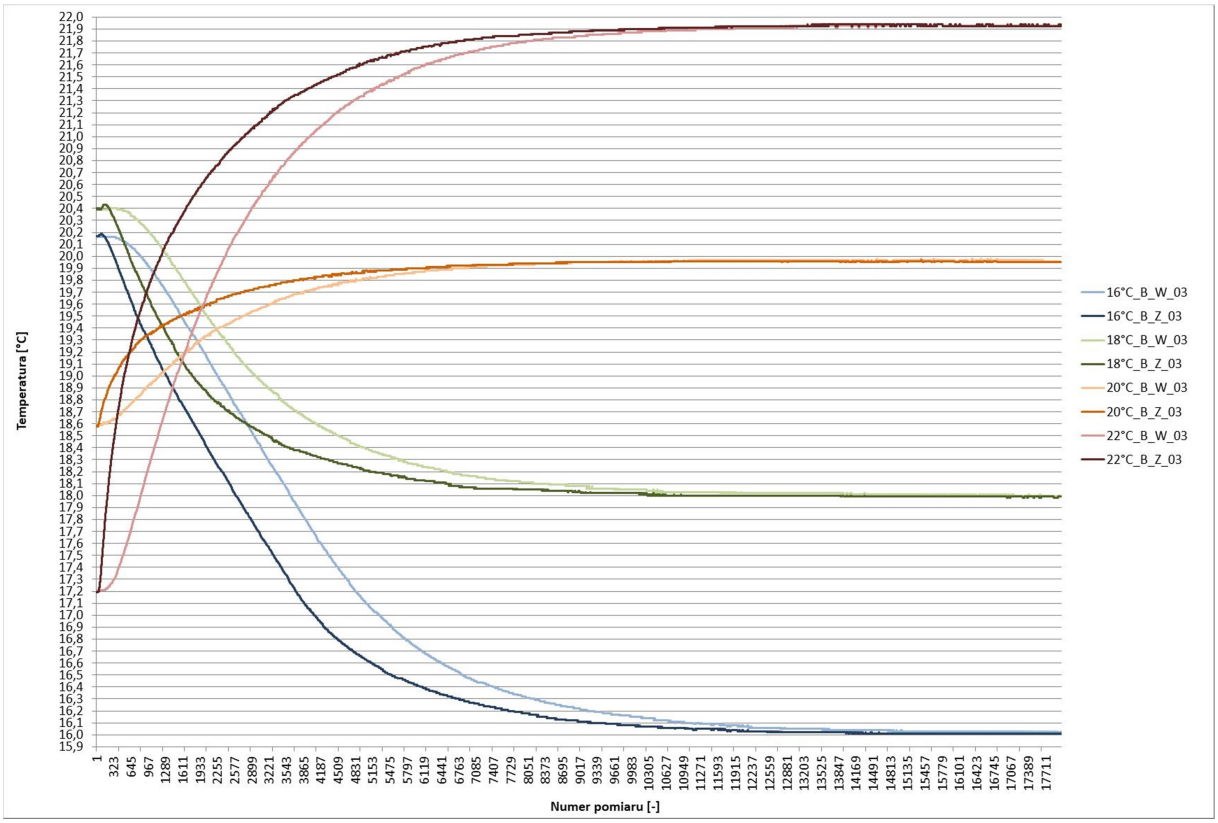
Rys. 5.40. Przebieg temperatury dla czujników B_W_14 i B_Z_14 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C do momentu uzyskania stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody



Rys. 5.41. Przebieg temperatury dla czujników B_W_01 i B_Z_01 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C do momentu uzyskania stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody



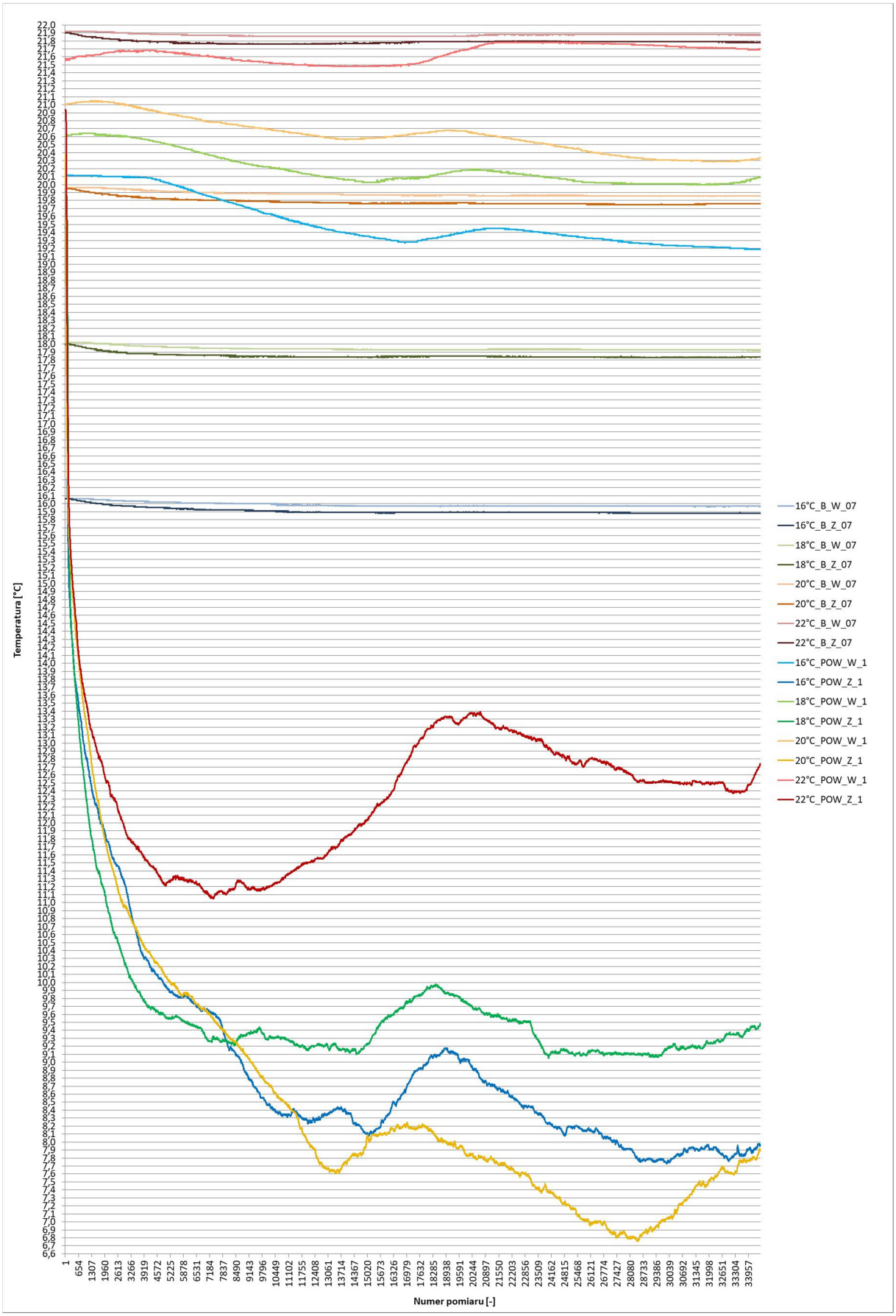
Rys. 5.42. Przebieg temperatury dla czujników B_W_11 i B_Z_11 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C do momentu uzyskania stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody



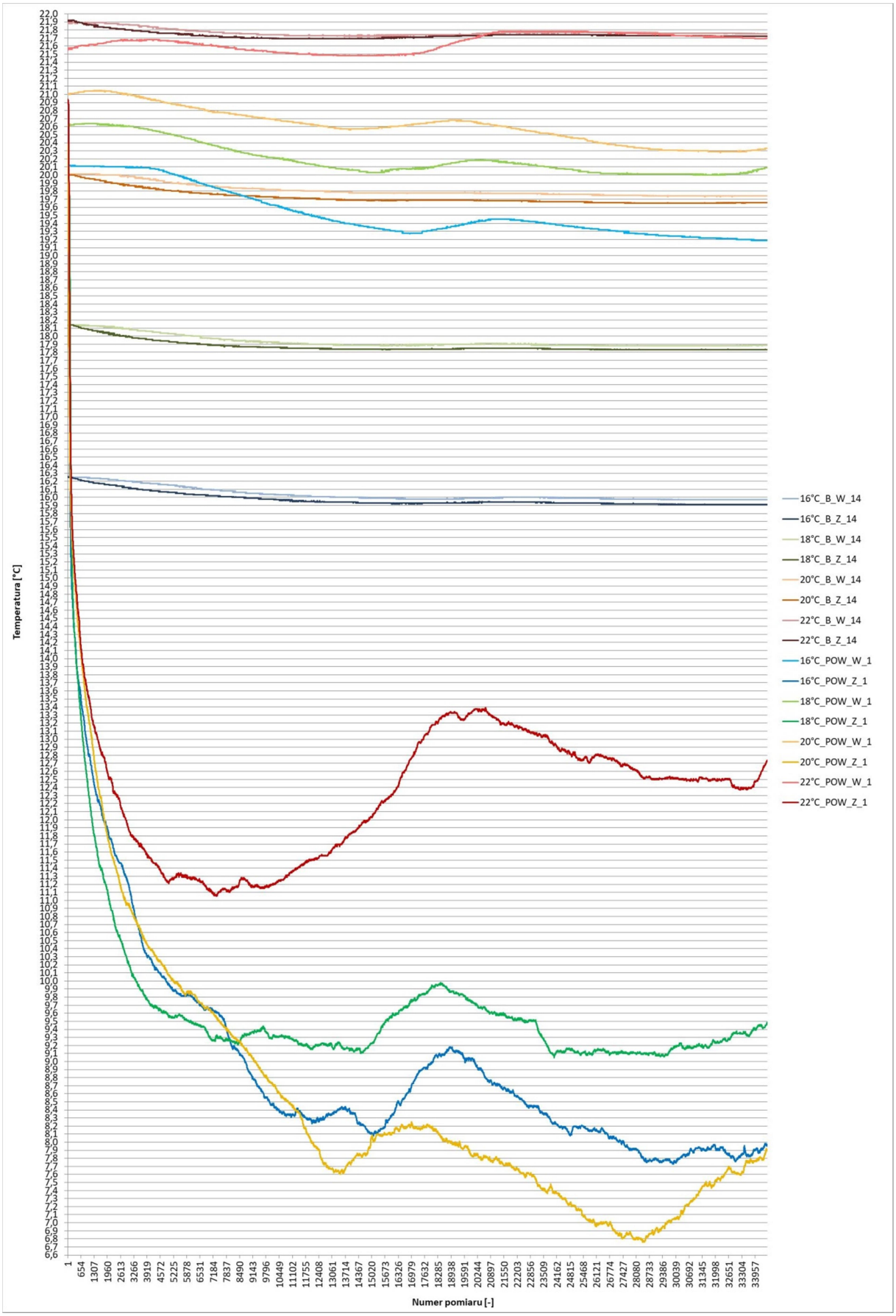
Rys. 5.43. Przebieg temperatury dla czujników B_W_03 i B_Z_03 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C do momentu uzyskania stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

5.4.2. Przebieg temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

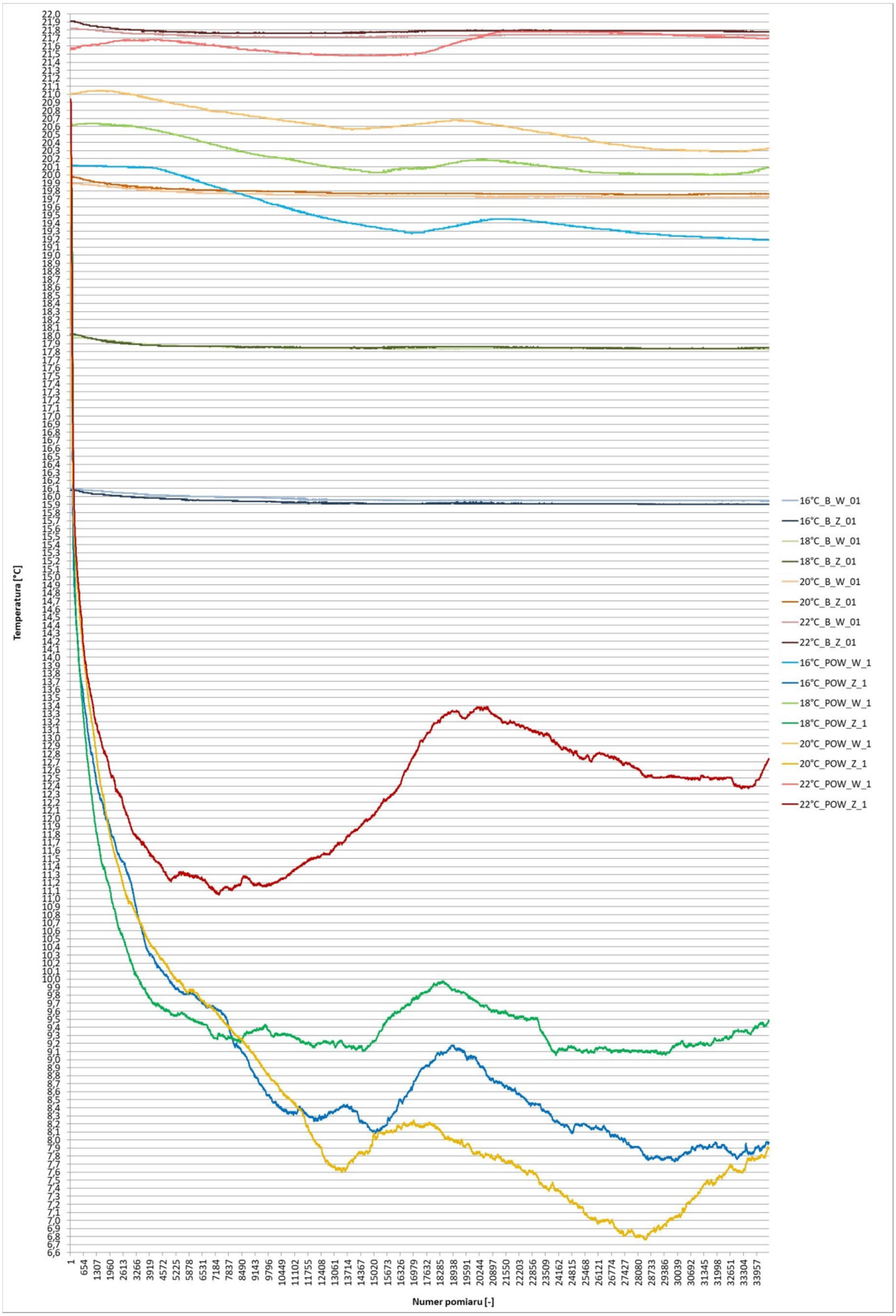
Przebieg temperatury zewnętrznej zobrazowano za pomocą krzywej z symbolem POW_Z_1 (Rys. 5.44 – Rys. 5.48), reprezentującej wskazania czujnika umieszczonego w strefie powietrznej zewnętrznej. Kolejna krzywa odnosząca się do temperatury powietrza została sporządzona dla wartości wskazań czujnika POW_W_1 zamontowanego w strefie wewnętrznej.



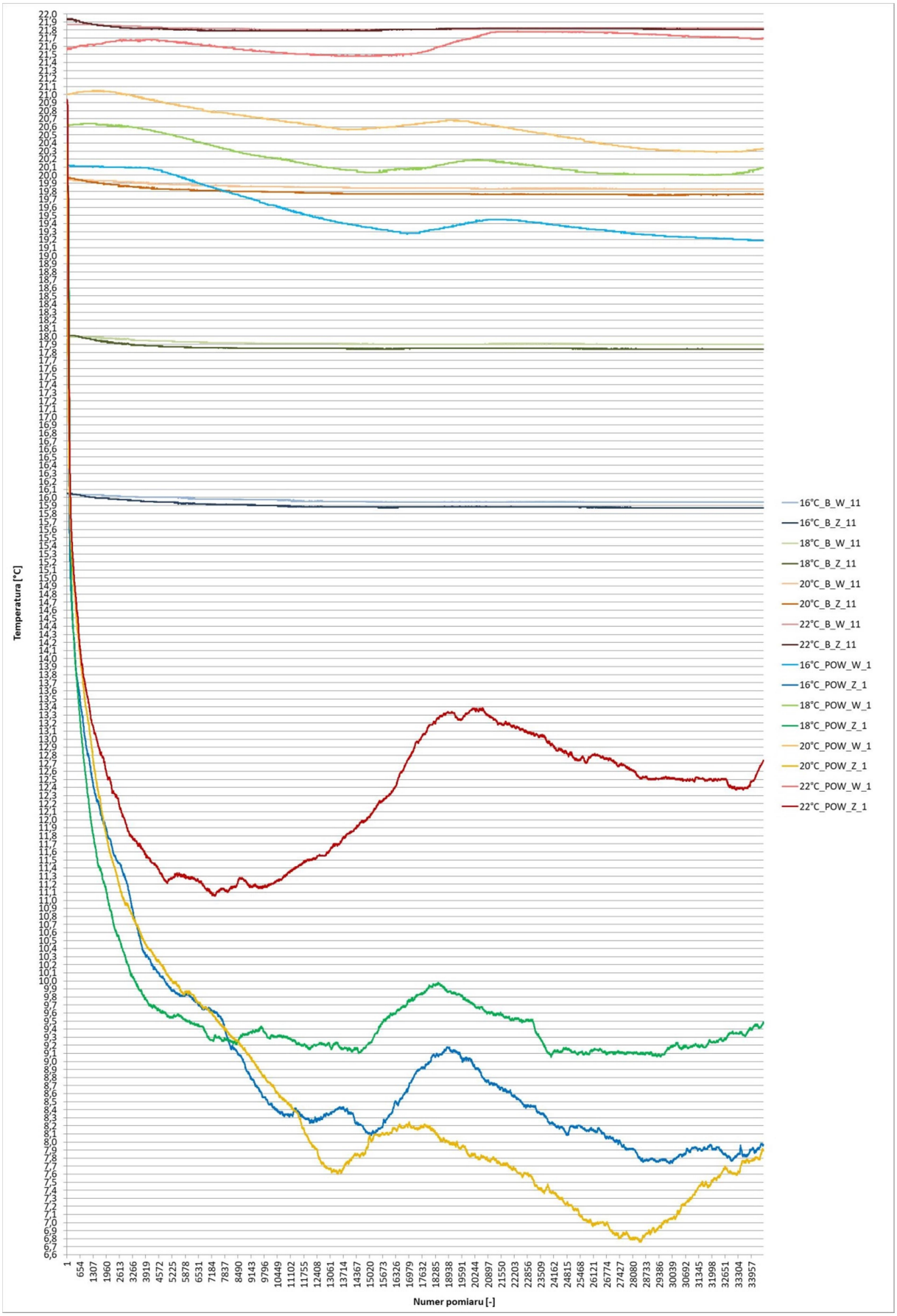
Rys. 5.44. Przebieg temperatury dla czujników B_W_07 i B_Z_07 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C dla zmiennej temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni



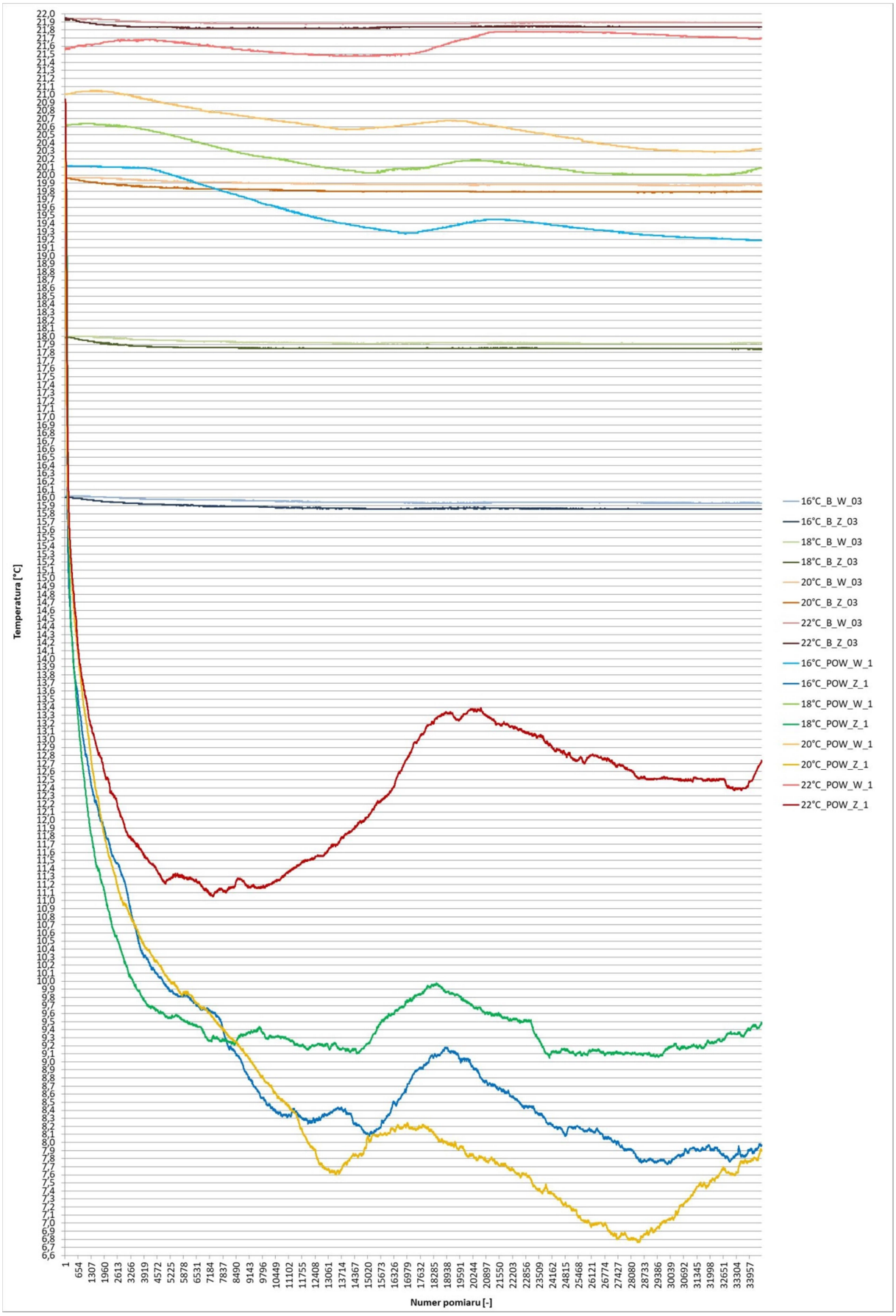
Rys. 5.45. Przebieg temperatury dla czujników B_W_14 i B_Z_14 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C dla zmiennej temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni



Rys. 5.46. Przebieg temperatury dla czujników B_W_01 i B_Z_01 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C dla zmiennej temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni



Rys. 5.47. Przebieg temperatury dla czujników B_W_11 i B_Z_11 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C dla zmiennej temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni



Rys. 5.48. Przebieg temperatury dla czujników B_W_03 i B_Z_03 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C dla zmiennej temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Przegroda aktywowana termicznie reaguje z opóźnieniem na zmienną temperaturę powietrza zewnętrznego bez względu na lokalizację czujnika pomiarowego na powierzchni betonowej ściany oraz na jej temperaturę zasilania. Powierzchnia od strony przestrzeni powietrznej wewnętrznej (oznaczenia czujników z literą W) okazała się prawie odporna na oddziaływanie różnej temperatury po jej drugiej stronie, czyli w strefie zewnętrznej. W tablicy: Tablica 5.2 przedstawiono czas odczytu mierzony od momentu uruchomienia wentylatora do chwili, gdy nastąpi zmiana temperatury o 0,02°C. Różnica temperatury wynosząca 0,1°C dla niektórych czujników nie wystąpiła w analizowanym okresie, czyli w ciągu 48 godzin (Tablica 5.3). Dotyczyło to czujników: B_W_11 dla nastawy 18°C i 22°C oraz dla tych samych wartości i dodatkowo temperatury zasilania równej 16°C dla czujnika B_W_03. Dla pozostałych czujników czas się wydłużył, w niektórych przypadkach nawet 9-krotnie, np. dla czujnika B_W_11 przy temperaturze zasilania równej 16°C. Temperatura powietrza w strefie wewnętrznej spadła o 0,1°C po około 6 godzinach, natomiast dla nastawy 22°C wzrosła o tą samą wartość po 3 godzinach.

Tablica 5.2. Czas reakcji czujników pomiarowych po którym nastąpiła zmiana temperatury o 0,02°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Nastawa temperatury ultratermostatu [°C] / Numer czujnika [-]	16	18	20	22
	czas reakcji [godzina i minuty]			
B_W_07	2 h 51 min	2 h 38 min	3 h 34 min	3 h 24 min
B_W_14	1 h 21 min	2 h 2 min	3 h 34 min	3 h 29 min
B_W_01	1 h 28 min	1 h 14 min	1 h 21 min	1 h 16 min
B_W_11	2 h 25 min	2 h 20 min	2 h 33 min	3 h 44 min
B_W_03	2 h 41 min	2 h 2 min	3 h 34 min	3 h 39 min
POW_W_1	2 h 15 min	1 h 7 min	0 h 28 min	0 h 43 min

Tablica 5.3. Czas reakcji czujników pomiarowych po którym nastąpiła zmiana temperatury o 0,1°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Nastawa temperatury ultratermostatu [°C] / Numer czujnika [-]	16	18	20	22
	czas reakcji [godzina i minuty]			
B_W_07	-	-	31 h 57 min	-
B_W_14	6 h 16 min	6 h 22 min	6 h 37 min	8 h 10 min
B_W_01	10 h 24 min	6 h 1 min	6 h 26 min	8 h 36 min
B_W_11	21 h 27 min	-	19 h 29 min	-
B_W_03	-	-	41 h 29 min	-
POW_W_1	6 h 58 min	6 h 35 min	6 h 35 min	3 h 38 min

Czujniki na powierzchni ściany pod warstwą izolacji z oznaczeniem B_Z, czyli od strony strefy zewnętrznej wskazywały temperatury nieróżniące się więcej niż o 0,1°C od zarejestrowanych wartości na powierzchni po jej drugiej stronie za pomocą czujników B_W.

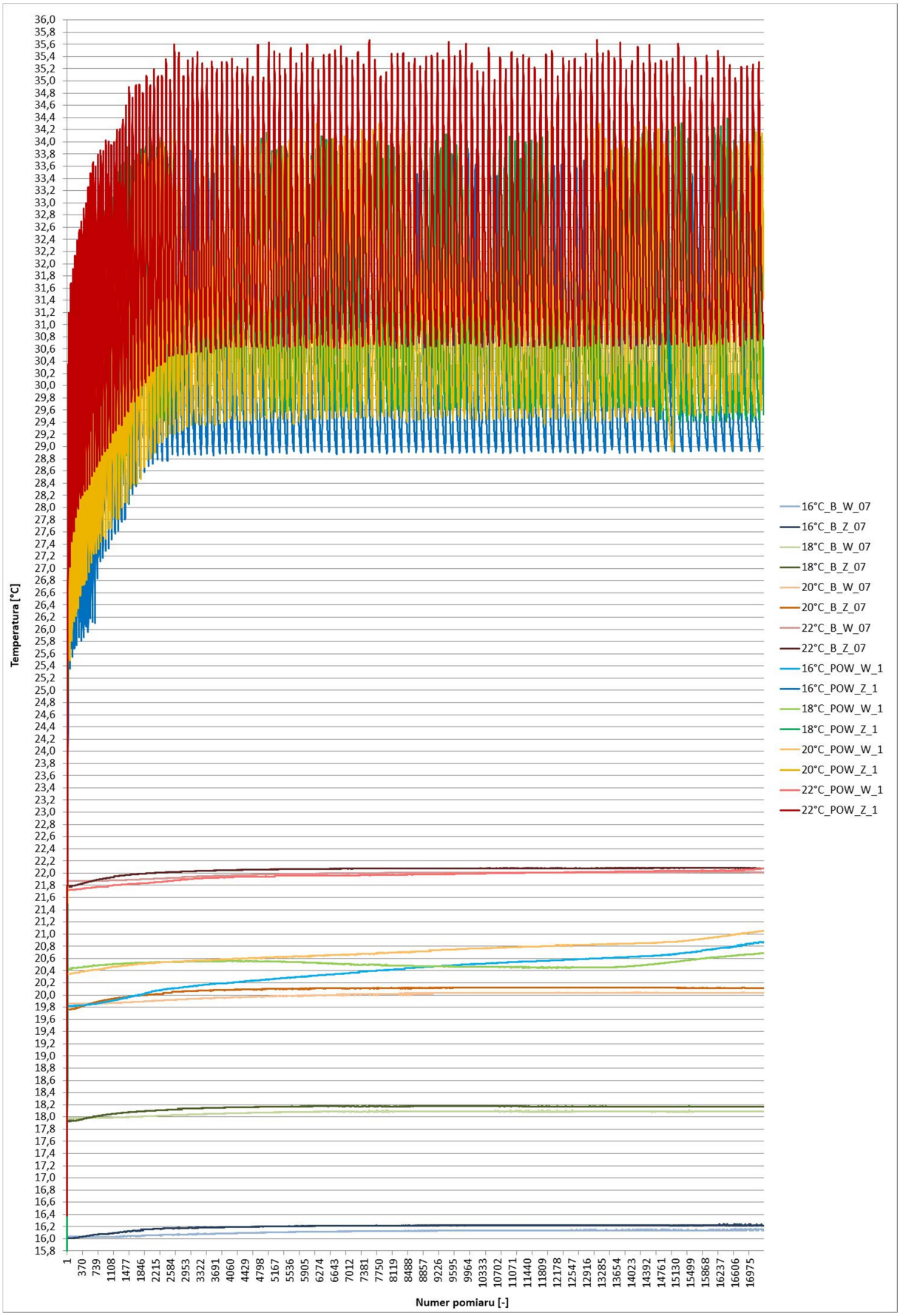
Najniższa wartość temperatury w strefie zewnętrznej równa 6,76°C wystąpiła o godz. 5:23:16 podczas drugiej doby pomiarów wykonanych dla nastawy ultratermostatu wynoszącej 20°C, wówczas wartości temperatury na powierzchni przegrody betonowej pod warstwą styropianu nie spadły poniżej wartości 19,65°C, a temperatura w strefie wewnętrznej wyniosła 20,34°C. Przebieg temperatury prezentowany za pomocą krzywej 20°C_POW_Z_1 uzyskał po około dobie od włączenia wentylatora o godz. 13:31:36 wartość 8,25°C, czyli maksymalną wskazaną w tej strefie tego dnia temperaturą. W tym momencie temperatura w strefie wewnętrznej była równa 20,62°C, a między warstwą betonu i styropianu nie niższa niż 19,69°C.

W przypadku serii pomiarowej wykonanej dla najniższej temperatury nastawy ultratermostatu równej 16°C temperaturę minimalną powietrza w strefie zewnętrznej zarejestrowano o godz. 4:11:14 w drugim dniu pomiarów i była to wartość 7,73°C. W tym samym czasie temperatura w strefie wewnętrznej osiągnęła wartość 19,24°C, a między warstwą betonu i styropianu wyniosła 15,86°C. Dzień wcześniej o godz. 12:52:59 zaobserwowano najwyższą temperaturę w strefie zewnętrznej w okresie dwóch dni po włączeniu wentylatora równą 9,18°C, natomiast czujniki wskazały odpowiednio: POW_W_1 19,35°C, a czujniki z oznaczeniem B (na powierzchni betonu) wartości nie niższe niż 15,87°C.

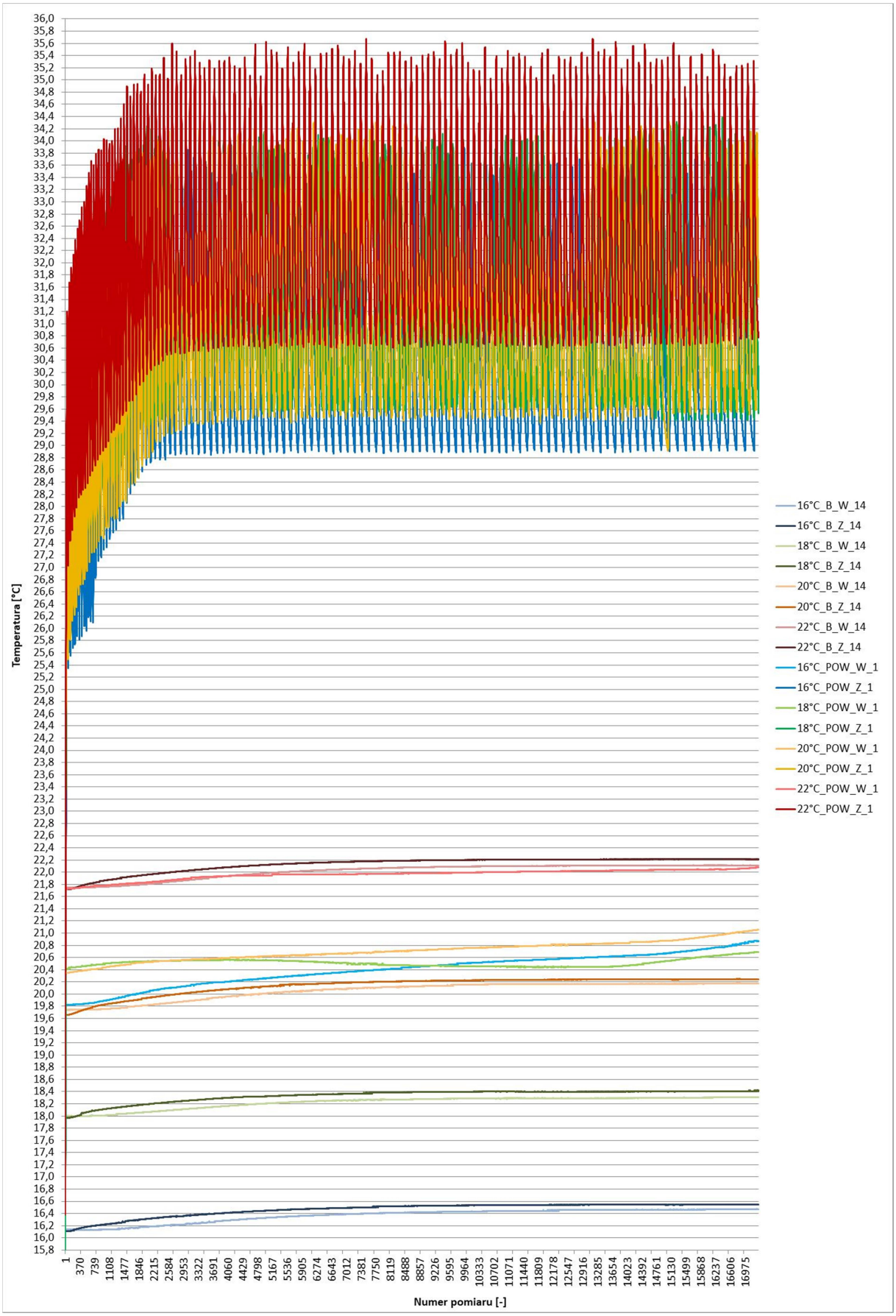
Podczas cyklu pomiarowego przeprowadzonego dla temperatury nastawy ultratermostatu równej 22°C, czyli najwyższej poddanej badaniom, temperaturę minimalną zanotowano w dniu włączenia wentylatora o godz. 21:07:42 i wyniosła ona 11,05°C. Następnego dnia o godz. 15:34:12 maksymalna zarejestrowana temperatura osiągnęła wartość 13,39°C i była to jednocześnie najwyższa temperatura spośród wszystkich przebiegów temperatury w strefie zewnętrznej dla danych nastaw po dobie od włączeniu wentylatora. Pozostałe wartości temperatur w strefie wewnętrznej wyniosły odpowiednio: 21,6°C w czasie wystąpienia temperatury minimalnej, 21,74°C w przypadku maksymalnej, natomiast dla pomiaru na powierzchni betonu to wartości temperatur nie spadły poniżej 21,72°C dla temperatury minimalnej, a 21,73°C dla temperatury maksymalnej.

5.4.3. Wymuszenie skokowe temperatury zewnętrznej

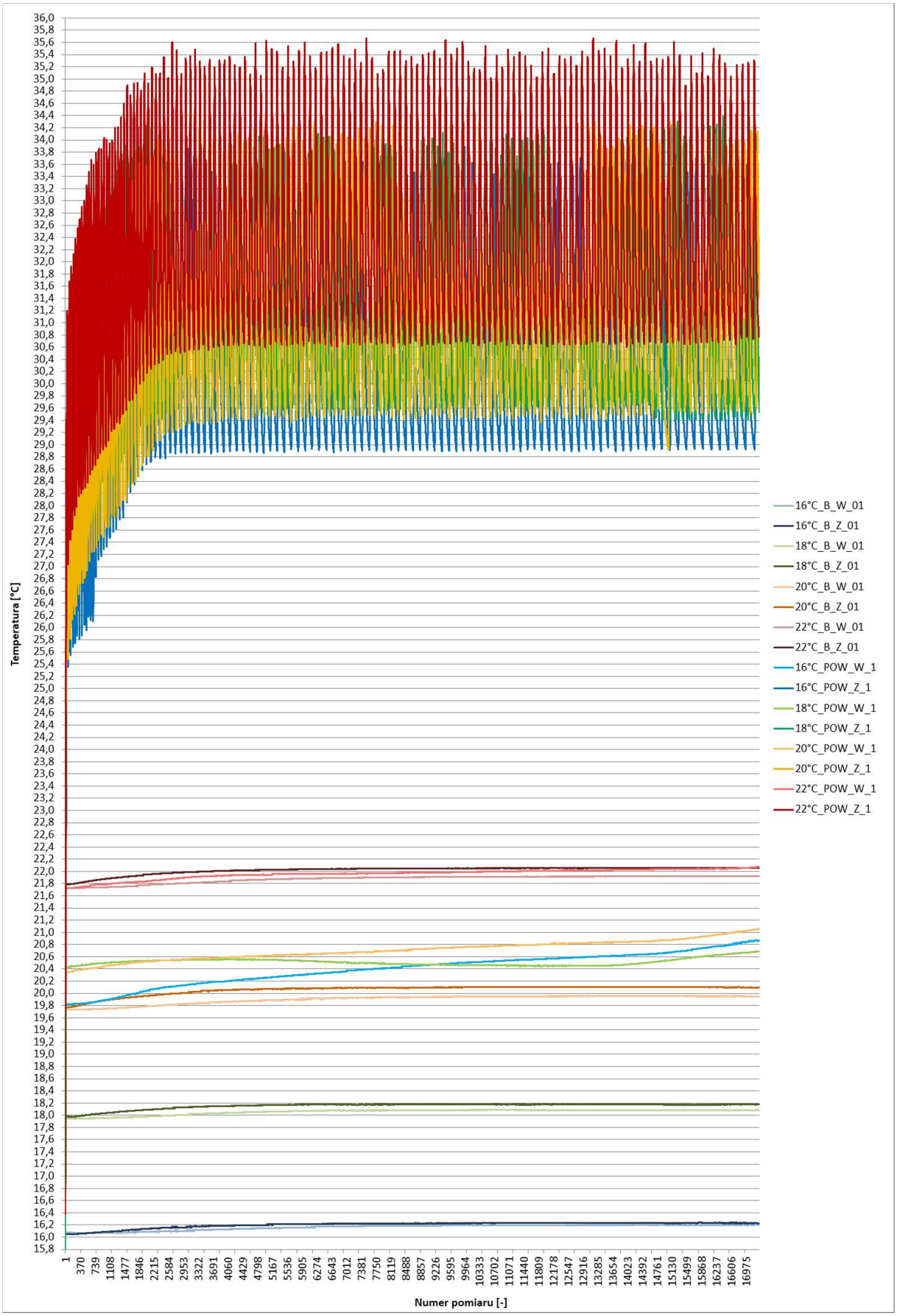
Do oceny reakcji przegrody na wymuszenie skokowe temperatury zewnętrznej posłużono się wykresami: Rys. 5.49 – Rys. 5.53, na których zobrazowano, oprócz przebiegu temperatur w punktach styku ściany betonowej z warstwą styropianu, przebieg temperatury w przestrzeniach powietrznych: wewnętrznej (czujnik POW_W_1) i zewnętrznej (czujnik POW_Z_1).



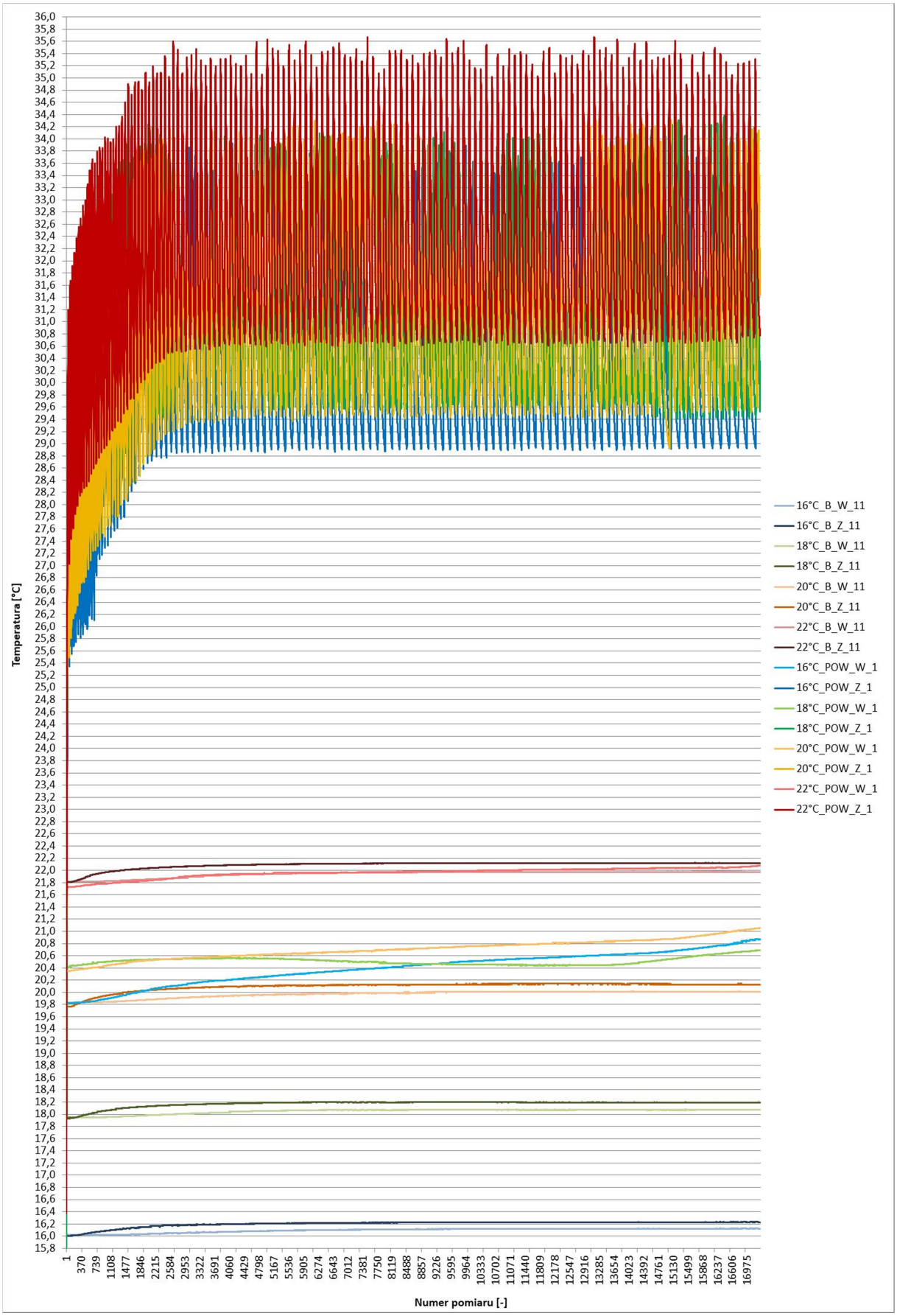
Rys. 5.49. Przebieg temperatury dla czujników B_W_07 i B_Z_07 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C dla wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej



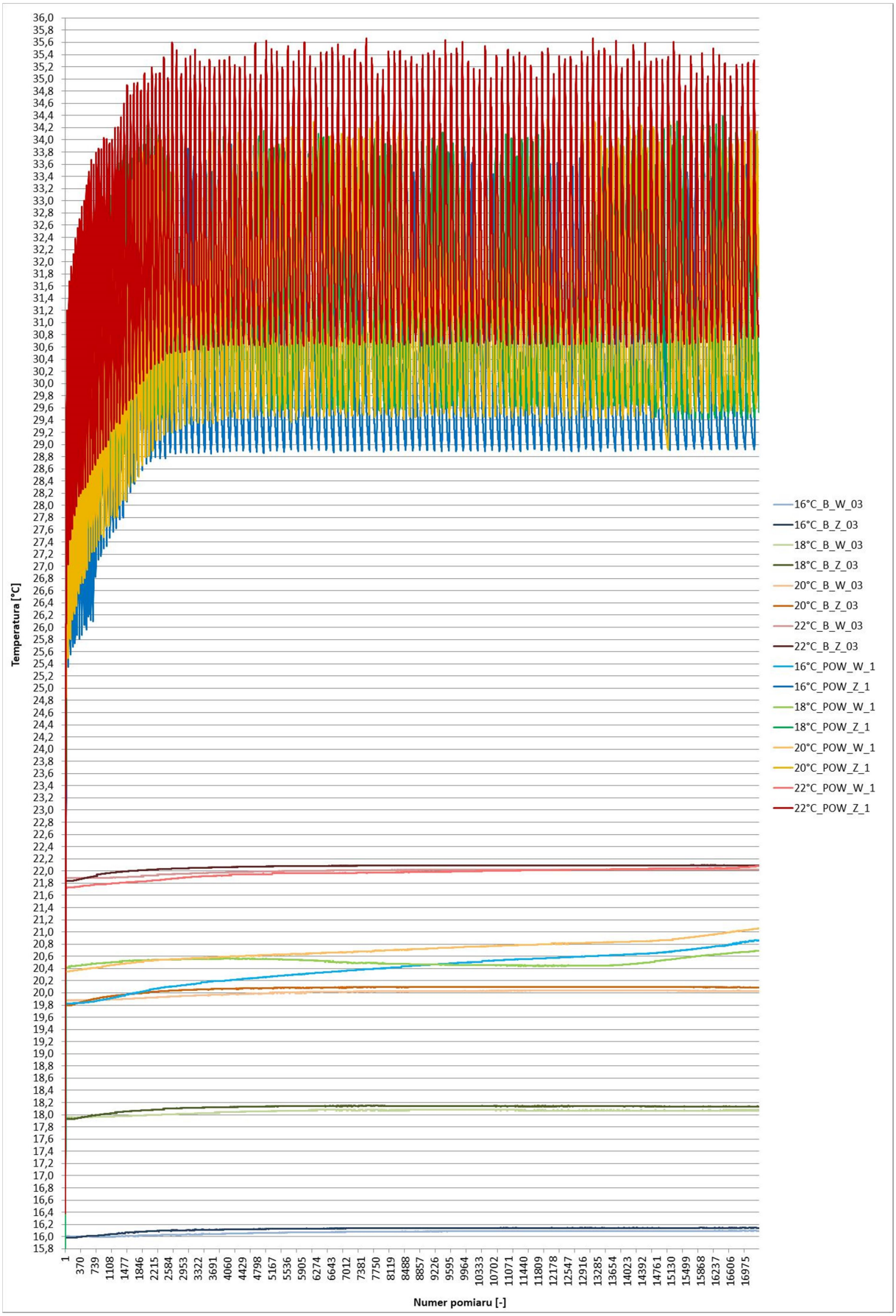
Rys. 5.50. Przebieg temperatury dla czujników B_W_14 i B_Z_14 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C dla wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej



Rys. 5.51. Przebieg temperatury dla czujników B_W_01 i B_Z_01 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C dla wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej



Rys. 5.52. Przebieg temperatury dla czujników B_W_11 i B_Z_11 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C dla wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej



Rys. 5.53. Przebieg temperatury dla czujników B_W_03 i B_Z_03 dla nastaw: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C dla wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Przegroda na wymuszenie skokowe temperatury zewnętrznej również okazała się prawie odporna. Czas reakcji czujników podczas wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej uległ skróceniu w stosunku do poprzedniego etapu badań z powodu utrzymywania różnicy temperatury po obu stronach przegrody równej co najmniej 10°C. W poniższych tablicach zestawiono czas po którym nastąpiła zmiana wskazań czujników o 0,02°C (Tablica 5.4) oraz 0,1°C (Tablica 5.5) w porównaniu do temperatury początkowej. W obu przypadkach na powierzchni przegrody od strony strefy wewnętrznej zmiana temperatury następowała najpóźniej podczas zasilania jej czynnikiem (wodą) o temperaturze 16°C. W przypadku czujnika B_W_03, czyli umieszczonego 30 cm poniżej centralnego czujnika, wzrost temperatury 0,02°C pojawił się wówczas po 3 godzinie i 22 minutach, a o 0,1°C w ogóle nie wystąpił podczas badań, czyli 24 godzin. W przestrzeni powietrznej wewnętrznej czujnik POW_W_1 wskazywał dla nastawy temperatury ultratermostatu równej 16°C temperaturę wyższą o 0,02°C po czasie 39 minut, a po 1 godzinie i 38 minutach wyższą o 0,1°C w stosunku do temperatury początkowej.

Tablica 5.4. Czas reakcji czujników pomiarowych po którym nastąpiła zmiana temperatury o 0,02°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Nastawa temperatury ultratermostatu [°C] / Numer czujnika [-]	16	18	20	22
	czas reakcji [godzina i minuty]			
B_W_07	2 h 41 min	1 h 36 min	1 h 53 min	2 h 3 min
B_W_14	1 h 56 min	1 h 26 min	1 h 14 min	1 h 32 min
B_W_01	3 h 11 min	1 h 49 min	1 h 26 min	1 h 30 min
B_W_11	2 h 55 min	1 h 56 min	1 h 44 min	1 h 53 min
B_W_03	3 h 22 min	1 h 43 min	1 h 58 min	2 h 11 min
POW_W_1	0 h 39 min	0 h 10 min	0 h 17 min	0 h 19 min

Tablica 5.5. Czas reakcji czujników pomiarowych po którym nastąpiła zmiana temperatury o 0,1°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Nastawa temperatury ultratermostatu [°C] / Numer czujnika [-]	16	18	20	22
	czas reakcji [godzina i minuty]			
B_W_07	12 h 31 min	6 h 15 min	5 h 5 min	5 h 47 min
B_W_14	4 h 14 min	3 h 46 min	3 h 17 min	3 h 35 min
B_W_01	10 h 22 min	5 h 32 min	4 h 11 min	5 h 14 min
B_W_11	13 h 5 min	6 h 27 min	4 h 58 min	5 h 19 min
B_W_03	-	7 h 16 min	5 h 40 min	6 h 31 min
POW_W_1	1 h 38 min	1 h 35 min	1 h 25 min	2 h 9 min

Różnica temperatur po obu stronach przegrody pod warstwą izolacji osiągnęła wartości nie większe niż 0,25°C. Pod koniec badań wartość ta dotyczyła punktu pomiarowego 14 i temperatury zasilania przewodów (pętli) równej 22°C. Zostało to spowodowane umieszczeniem czujników B_W_14 i B_Z_14 w skrajnej górnej części ściany oraz najwyższą temperaturą w przestrzeni powietrznej zewnętrznej równą w tym czasie o godz. 11:51:07 30,81°C. Temperatura w strefie wewnętrznej zilustrowana przez krzywą 22°C_POW_W_1 osiągnęła wartość 22,08°C, o 0,36°C wyższą od temperatury początkowej.

W kwestii najniższej przebadanej nastawy temperatury ultratermostatu równej 16°C zauważono wzrost temperatury w przestrzeni powietrznej wewnętrznej z 19,82°C do 20,87°C (różnica 1,05°C), mimo to temperatura na powierzchni betonu od strony tej strefy dla najbardziej niekorzystnej lokalizacji czujnika B_W_14 zwiększyła się jedynie o 0,33°C od początku pomiarów (z 16,14°C do 16,47°C).

W przypadku dwóch pozostałych wartości temperatury zasilania równej: 18°C i 20°C temperatura w strefie wewnętrznej była równa 20,41°C i 20,35°C, a na koniec badań (pomiar 17310) wynosiła 20,69°C i 21,06°C.

6. Porównanie modelu numerycznego z badaniami doświadczalnymi

W następnym etapie pracy porównano wyniki uzyskane z modelu numerycznego z przeprowadzonymi badaniami doświadczalnymi.

W tym celu wyznaczono wartości bezwzględne różnicy temperatury między wartościami obliczonymi z modelu dla danego punktu pomiarowego, a danymi zapisanymi podczas badań doświadczalnych dla czujnika umieszczonego w tym samym punkcie pomiarowym. Dla każdego zbioru wartości bezwzględnych wyznaczono ich wartość maksymalną, minimalną i średnią, które zestawiono w tablicach w zależności od numeru czujnika. Wspomniane wartości wyznaczono dla czujników zamontowanych na powierzchni warstw: betonu od strony wewnętrznej (czujnik z oznaczeniem B_W) i zewnętrznej (symbol B_Z) oraz styropianu w strefie wewnętrznej oraz zewnętrznej (odpowiednio skróty: S_W i S_Z). Dodatkowo zamieszczono wyniki dla czujników zlokalizowanych na powierzchni przewodów zabetonowanych w ścianie.

Uzyskane rezultaty przypisano do każdego z 3 etapów badań:

- stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody,
- przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni,
- wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

dla każdego z 4 wariantów temperatury zasilania pętli w ścianie: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C.

Dla wszystkich powyższych opcji wykonano wykres prezentujący przebieg temperatury dla czujników zlokalizowanych w osi symetrii przegrody. Zobrazowano wyniki dla czujników na powierzchni betonu po stronie wewnętrznej B_W_07 i zewnętrznej B_Z_07 oraz na powierzchni styropianu w strefie wewnętrznej S_W_2 oraz zewnętrznej S_Z_2. W przypadku temperatury na powierzchni pętli umieszczonej wewnątrz ściany zilustrowano przebieg dla 2 czujników zamontowanych na przewodzie najbliżej osi symetrii przegrody: P13 oraz P14. Krzywe narysowane linią ciągłą dotyczą wyników pomiarów doświadczalnych i w legendzie są przypisane do odpowiednich symboli czujników. W przypadku rezultatów z obliczeń numerycznych krzywe prezentujące określony czujnik przedstawiono linią przerywaną, a w legendzie dopisano komentarz „-model".

Kolejny wskaźnik, który posłużył do porównania to parametr RMSE wyznaczony na podstawie poniższego równania (1) [54]:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{Ts_i} - \mathrm{Tm_i})^2} \qquad (1)$$

gdzie:
n – liczba pomiarów, [-],
$\mathrm{Ts_i}$ – temperatura obliczona z modelu numerycznego, [°C],
$\mathrm{Tm_i}$ – temperatura zmierzona, [°C].

6.1. Stabilizacja temperatury na powierzchni przegrody

W poniższym rozdziale przedstawiono wyniki dotyczące okresu 13 godzin rozpoczęty od momentu osiągnięcia stabilnej temperatury zasilania pętli do chwili uzyskania stabilnej temperatury na powierzchni przegrody.

W tablicach: Tablica 6.1 – Tablica 6.8 przedstawiono wyniki wartości bezwzględnych różnicy temperatury dla czujników podczas etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody. Tablica 6.1, Tablica 6.3, Tablica 6.5 oraz Tablica 6.7 dotyczą czujników zamontowanych na powierzchni warstw: betonu oraz styropianu dla poszczególnych 4 opcji temperatury zasilania pętli wewnątrz przegrody: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C. Analogicznie dla tych samych wartości temperatury zasilania w tablicach: Tablica 6.2, Tablica 6.4, Tablica 6.6 i Tablica 6.8 zamieszczono wyniki dla czujników zlokalizowanych na powierzchni przewodów zabetonowanych w ścianie.

Na wykresach: Rys. 6.1 – Rys. 6.4 w formie graficznej porównano model numeryczny z badaniami doświadczalnymi przedstawiając przebieg temperatury dla wspomnianych wcześniej czujników.

W sytuacji zasilania pętli czynnikiem o temperaturze 16°C największą średnią wartość bezwzględną różnicy temperatury zaobserwowano dla czujników zlokalizowanych na powierzchni styropianu: S_W_1 oraz S_Z_1, odpowiednio wartości 0,65°C oraz 0,72°C (Tablica 6.1). Czujniki te przymocowano najbliżej podłogi, stąd pojawiły się takie rozbieżności. Dla punktów pomiarowych pod warstwą styropianu, czyli na powierzchni betonu, średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury tylko w 2 położeniach wyniosła 0,25°C i 0,27°C, w tym przypadku są to miejsca najbliżej zadaszenia (B_W_14 oraz B_Z_14). W pozostałych punktach nie przekroczyła 0,05°C, jedynie dla czujnika B_W_01 średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury wyniosła 0,07°C. Maksymalne wartości bezwzględne różnicy temperatury mieściły się w zakresie 0,07°C – 0,87°C i w większości przypadków wystąpiły w pierwszej godzinie symulacji. W kwestii minimalnych wartości bezwzględnej różnicy temperatury wartości wynosiły od 0,00°C do 0,42°C.

Tablica 6.1. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 16°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,24	0,00	0,07
B_W_02	0,17	0,00	0,04
B_W_03	0,13	0,00	0,05
B_W_04	0,17	0,00	0,04
B_W_05	0,19	0,00	0,05

Tablica 6.1. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 16°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

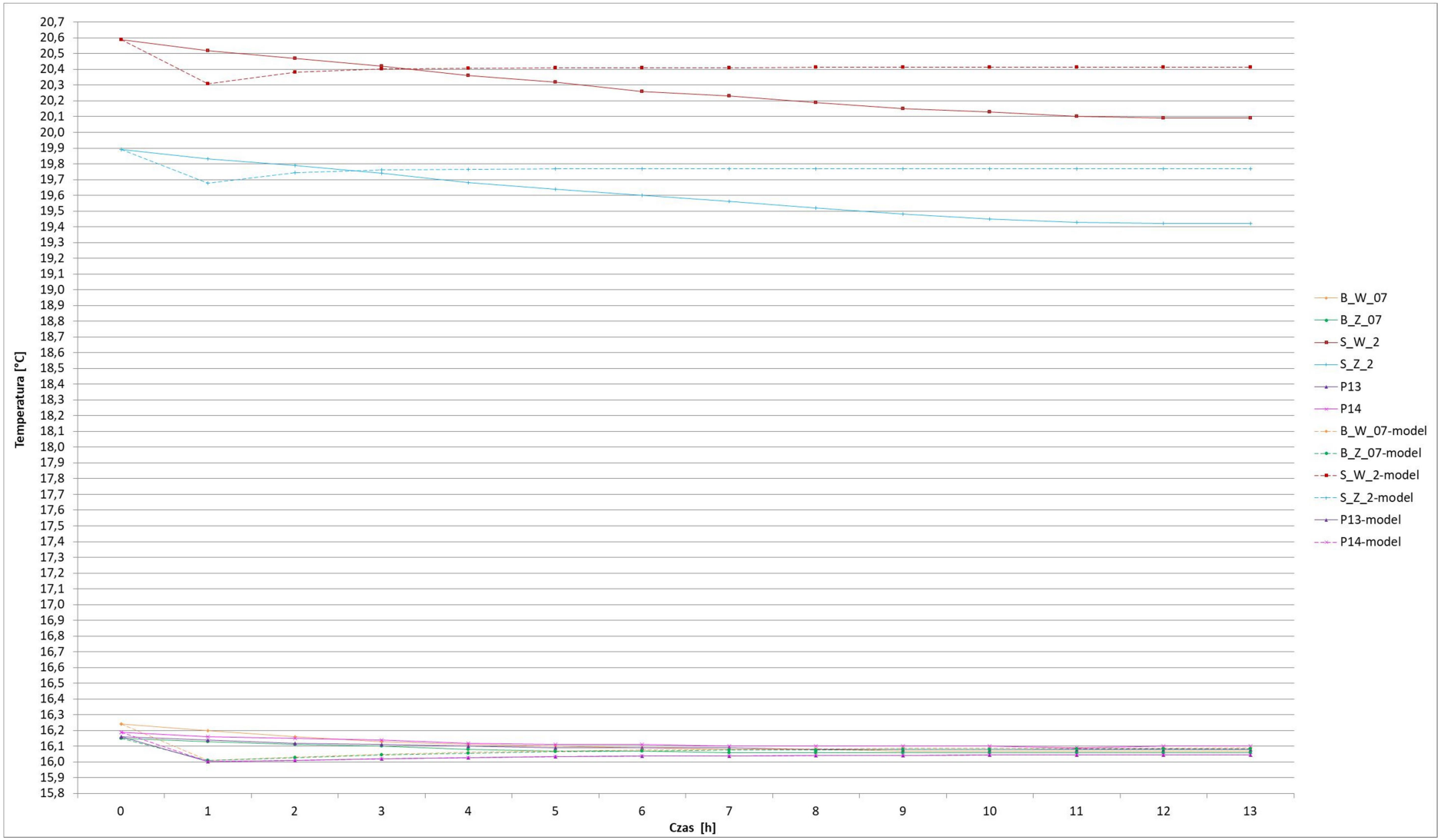
Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_06	0,16	0,00	0,04
B_W_07	0,19	0,00	0,04
B_W_08	0,18	0,00	0,05
B_W_09	0,17	0,01	0,05
B_W_10	0,20	0,00	0,05
B_W_11	0,15	0,00	0,05
B_W_12	0,18	0,00	0,05
B_W_13	0,21	0,00	0,05
B_W_14	0,55	0,15	0,27
B_Z_01	0,15	0,00	0,04
B_Z_02	0,07	0,01	0,05
B_Z_03	0,08	0,00	0,05
B_Z_04	0,11	0,01	0,04
B_Z_05	0,08	0,02	0,05
B_Z_06	0,09	0,01	0,04
B_Z_07	0,12	0,00	0,03
B_Z_08	0,15	0,00	0,04
B_Z_09	0,13	0,00	0,03
B_Z_10	0,11	0,00	0,04
B_Z_11	0,12	0,01	0,04
B_Z_12	0,10	0,01	0,05
B_Z_13	0,18	0,01	0,05
B_Z_14	0,47	0,15	0,25
S_W_1	0,81	0,32	0,65
S_W_2	0,32	0,02	0,19
S_W_3	0,59	0,07	0,41
S_Z_1	0,87	0,42	0,72
S_Z_2	0,35	0,02	0,21
S_Z_3	0,69	0,21	0,51

Dla 4 czujników umieszczonych na powierzchni przewodów średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury przekroczyła 0,10°C (Tablica 6.2). Sytuacja ta wystąpiła w miejscach najbliżej dachu. W tych samych położeniach osiągnięto największe wartości bezwzględne różnicy temperatury dla wielkości maksymalnych i minimalnych. Maksymalne wartości bezwzględne różnicy temperatury w granicach 0,11°C – 0,44°C zaobserwowano w pierwszej godzinie obliczeń, natomiast minimalne w zakresie 0,01°C – 0,19°C w ostatniej – 13 godzinie.

Tablica 6.2. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 16°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,19	0,05	0,09
P02	0,15	0,04	0,07
P03	0,11	0,01	0,04
P04	0,13	0,03	0,06
P05	0,13	0,03	0,06
P06	0,14	0,04	0,07
P07	0,14	0,04	0,07
P08	0,11	0,01	0,04
P09	0,15	0,04	0,07
P10	0,16	0,05	0,08
P11	0,14	0,03	0,07
P12	0,14	0,03	0,06
P13	0,14	0,03	0,06
P14	0,16	0,05	0,08
P15	0,16	0,04	0,08
P16	0,16	0,04	0,08
P17	0,15	0,04	0,08
P18	0,17	0,06	0,09
P19	0,15	0,04	0,07
P20	0,19	0,07	0,10
P21	0,18	0,05	0,09
P22	0,19	0,06	0,10
P23	0,21	0,07	0,11
P24	0,23	0,08	0,12
P25	0,36	0,18	0,24
P26	0,44	0,19	0,28

Na wykresie (Rys. 6.1) największe wartości bezwzględne różnicy temperatury dla czujników wewnątrz betonu i na jego powierzchni zauważono podczas pierwszej godziny symulacji. W przypadku pomiarów na powierzchni styropianu największe wartości bezwzględne różnicy dostrzeżono w ostatniej godzinie obliczeń (0,32°C dla czujnika S_W_2 oraz 0,35°C dla S_Z_2 – Tablica 6.1), co wiąże się ze spadkiem temperatury w strefach powietrznych: o 0,50°C w strefie wewnętrznej i 0,47°C w strefie zewnętrznej, model numeryczny natomiast przyjmuje stałą temperaturę powietrza w strefach. W tym samym czasie dla reszty czujników wartości bezwzględne różnicy przyjmują wartości minimalne (Tablica 6.1 oraz Tablica 6.2) bądź nie większe niż 0,10°C.



Rys. 6.1. Przebieg wskazań czujników temperatury umieszczonych w osi symetrii na powierzchni warstw przegrody: betonu, styropianu oraz na powierzchni przewodów wewnątrz ściany otrzymanych z pomiarów doświadczalnych i wyznaczonych z modelu numerycznego dla temperatury zasilania pętli równej 16°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Dla temperatury zasilania pętli umieszczonej wewnątrz betonu równej 18°C średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury zawierała się w zakresie 0,02°C – 0,38°C, przy czym największe graniczne wartości stwierdzono na powierzchni styropianu, podobnie jak w przypadku maksymalnej i minimalnej wartości bezwzględnej różnicy temperatury (Tablica 6.3). Dla czujników skrajnych dolnych: S_W_1 oraz S_Z_1 wartości maksymalne wyniosły 0,64°C i 0,68°C, a minimalne 0,12°C i 0,24°C. Dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu wartość bezwzględna różnicy temperatury nie przekroczyła dla wartości średniej 0,08°C, minimalnej 0,07°C, a dla maksymalnej 0,09°C.

Tablica 6.3. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,06	0,01	0,03
B_W_02	0,04	0,00	0,02
B_W_03	0,05	0,00	0,03
B_W_04	0,04	0,00	0,02
B_W_05	0,05	0,00	0,02
B_W_06	0,04	0,00	0,02
B_W_07	0,04	0,00	0,02
B_W_08	0,04	0,00	0,02
B_W_09	0,04	0,00	0,02
B_W_10	0,05	0,00	0,03
B_W_11	0,06	0,00	0,04
B_W_12	0,03	0,00	0,02
B_W_13	0,04	0,01	0,02
B_W_14	0,07	0,02	0,05
B_Z_01	0,07	0,00	0,03
B_Z_02	0,06	0,01	0,04
B_Z_03	0,06	0,01	0,04
B_Z_04	0,05	0,00	0,03
B_Z_05	0,07	0,00	0,05
B_Z_06	0,05	0,01	0,03
B_Z_07	0,05	0,00	0,03
B_Z_08	0,06	0,00	0,02
B_Z_09	0,04	0,00	0,03
B_Z_10	0,04	0,00	0,03
B_Z_11	0,05	0,01	0,02
B_Z_12	0,06	0,00	0,04
B_Z_13	0,06	0,00	0,02
B_Z_14	0,09	0,07	0,08
S_W_1	0,64	0,12	0,30
S_W_2	0,18	0,12	0,15
S_W_3	0,23	0,00	0,07

Tablica 6.3. c.d Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
S_Z_1	0,68	0,24	0,38
S_Z_2	0,12	0,03	0,08
S_Z_3	0,38	0,08	0,18

Wartości bezwzględne różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów osiągnęły wartości na poziomie: 0,03°C – 0,13°C (wartość średnia), 0,06°C – 0,15°C (wartość maksymalna) oraz 0,01°C – 0,12°C (wartość minimalna) (Tablica 6.4). Najniższe wartości bezwzględne różnicy dotyczą pola najbliżej osi symetrii, natomiast najwyższe punktów skrajnych górnych.

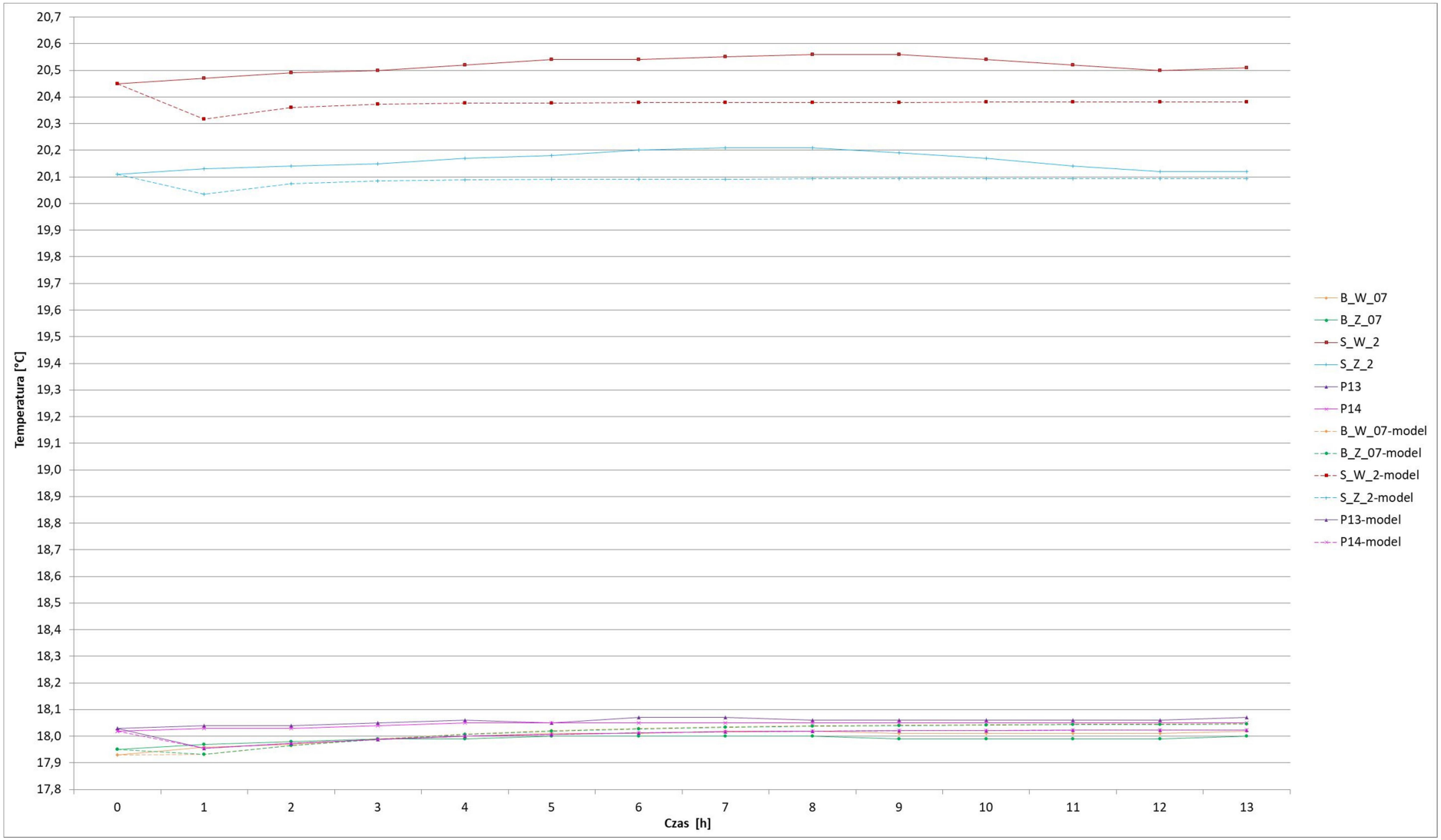
Tablica 6.4. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,09	0,04	0,06
P02	0,10	0,05	0,07
P03	0,08	0,03	0,04
P04	0,09	0,04	0,05
P05	0,08	0,02	0,03
P06	0,08	0,03	0,04
P07	0,12	0,05	0,07
P08	0,06	0,01	0,03
P09	0,07	0,03	0,04
P10	0,09	0,05	0,06
P11	0,09	0,05	0,06
P12	0,08	0,03	0,04
P13	0,08	0,04	0,05
P14	0,07	0,03	0,04
P15	0,08	0,04	0,06
P16	0,10	0,06	0,07
P17	0,09	0,05	0,07
P18	0,10	0,05	0,07
P19	0,09	0,03	0,05
P20	0,11	0,06	0,08
P21	0,12	0,07	0,08
P22	0,10	0,06	0,07

Tablica 6.4. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P23	0,10	0,06	0,07
P24	0,11	0,06	0,07
P25	0,15	0,12	0,13
P26	0,13	0,11	0,12

W pierwszej godzinie obliczeń numerycznych dla czujników na powierzchni betonu oraz wewnątrz przegrody wartości bezwzględne różnicy były największe (Rys. 6.2**Rys. 5.38**). W przypadku temperatury na powierzchni styropianu sytuacja taka wystąpiła w ósmej godzinie obliczeń (0,18°C dla czujnika S_W_2 oraz 0,12°C dla S_Z_2 –Tablica 6.3).



Rys. 6.2. Przebieg wskazań czujników temperatury umieszczonych w osi symetrii na powierzchni warstw przegrody: betonu, styropianu oraz na powierzchni przewodów wewnątrz ściany otrzymanych z pomiarów doświadczalnych i wyznaczonych z modelu numerycznego dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

W sytuacji temperatury zasilania równej 20°C wartość bezwzględna różnicy temperatury na powierzchni betonu osiągnęła zakres: 0,02°C – 0,10°C (wartość średnia), 0,00°C – 0,05°C (wartość minimalna) oraz 0,04°C – 0,13°C (wartość maksymalna). Wartości graniczne górne odnoszą się do czujnika najbliżej podłogi i umieszczonego od strony strefy wewnętrznej (czujnik o symbolu B_W_01). Tak samo temperatura na powierzchni styropianu osiąga najwyższe wartości w dolnej części przegrody, czujniki: S_W_1 oraz S_Z_1 z średnią wartością bezwzględną różnicy temperatury wynoszącą tym samym 0,43°C i 0,49°C.

Tablica 6.5. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,13	0,05	0,10
B_W_02	0,05	0,01	0,04
B_W_03	0,05	0,00	0,03
B_W_04	0,04	0,00	0,03
B_W_05	0,04	0,00	0,03
B_W_06	0,06	0,01	0,04
B_W_07	0,06	0,01	0,04
B_W_08	0,06	0,01	0,04
B_W_09	0,04	0,00	0,03
B_W_10	0,07	0,00	0,05
B_W_11	0,08	0,01	0,06
B_W_12	0,04	0,00	0,02
B_W_13	0,05	0,00	0,03
B_W_14	0,05	0,00	0,02
B_Z_01	0,04	0,00	0,02
B_Z_02	0,09	0,00	0,06
B_Z_03	0,06	0,00	0,04
B_Z_04	0,08	0,00	0,06
B_Z_05	0,09	0,00	0,06
B_Z_06	0,08	0,01	0,05
B_Z_07	0,07	0,01	0,04
B_Z_08	0,05	0,01	0,03
B_Z_09	0,10	0,01	0,06
B_Z_10	0,05	0,01	0,03
B_Z_11	0,06	0,01	0,04
B_Z_12	0,08	0,00	0,05
B_Z_13	0,05	0,00	0,03
B_Z_14	0,05	0,00	0,02
S_W_1	0,60	0,37	0,43
S_W_2	0,07	0,03	0,05
S_W_3	0,17	0,10	0,12
S_Z_1	0,56	0,46	0,49

Tablica 6.5. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
S_Z_2	0,02	0,00	0,01
S_Z_3	0,26	0,20	0,23

W odniesieniu do temperatury wewnątrz przegrody średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury wyniosła od 0,02°C do 0,13°C, maksymalna od 0,05°C do 0,16°C, a minimalna od 0,00°C do 0,11°C (Tablica 6.6). Najwyższe wartości dotyczą czujników skrajnych górnych: P25 oraz P26, natomiast najniższe czujników: P14 (najbliżej osi symetrii) oraz P01 (skrajny dolny).

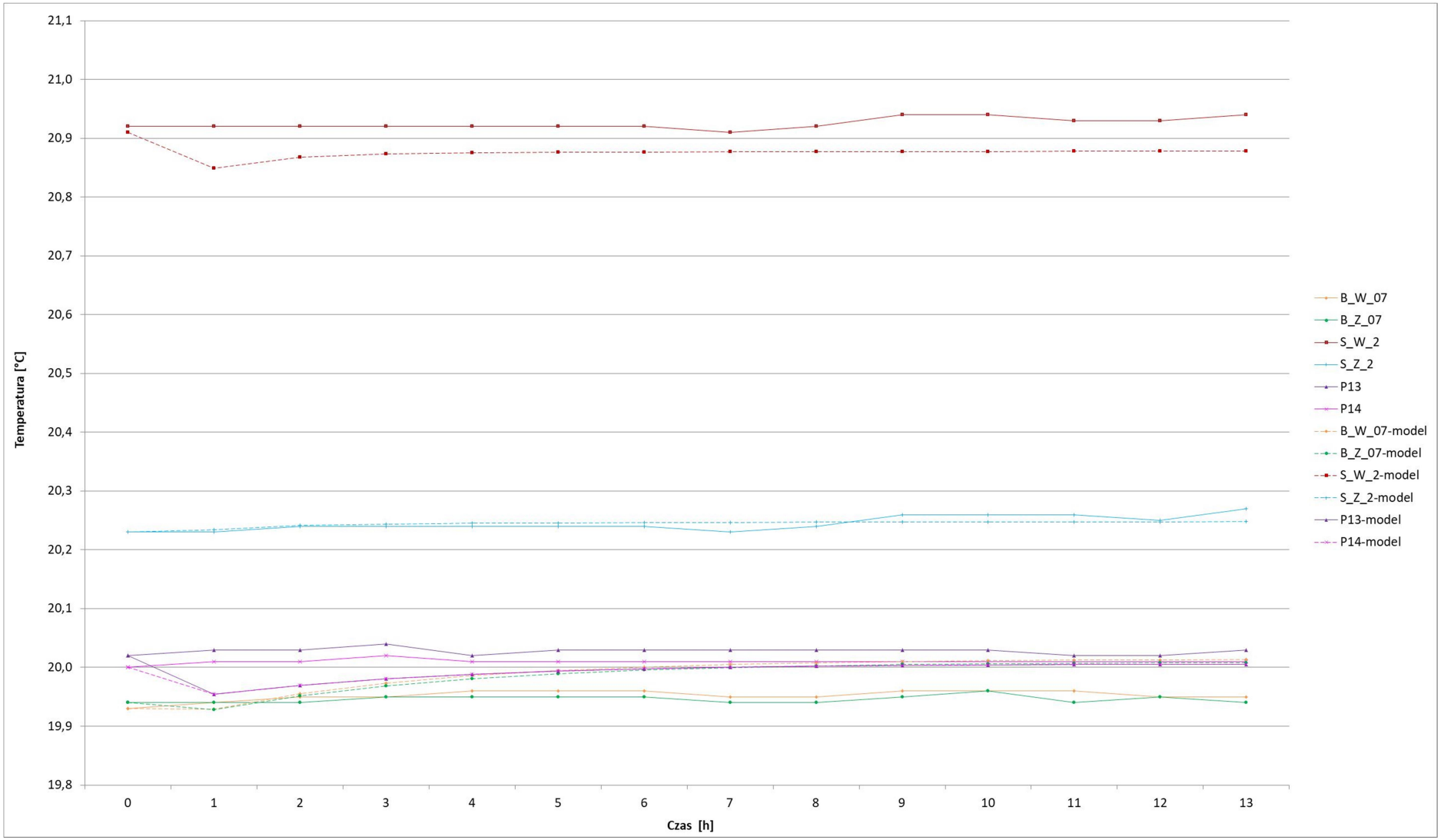
Tablica 6.6. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,05	0,00	0,02
P02	0,08	0,02	0,04
P03	0,06	0,00	0,02
P04	0,06	0,00	0,02
P05	0,06	0,00	0,02
P06	0,07	0,01	0,03
P07	0,09	0,03	0,05
P08	0,06	0,00	0,02
P09	0,07	0,00	0,02
P10	0,07	0,01	0,03
P11	0,08	0,01	0,03
P12	0,08	0,01	0,03
P13	0,08	0,01	0,04
P14	0,06	0,00	0,02
P15	0,07	0,01	0,03
P16	0,08	0,02	0,04
P17	0,08	0,02	0,04
P18	0,07	0,01	0,03
P19	0,08	0,02	0,04
P20	0,09	0,03	0,05
P21	0,09	0,02	0,04
P22	0,08	0,02	0,04
P23	0,09	0,03	0,05

Tablica 6.6. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P24	0,08	0,03	0,04
P25	0,16	0,11	0,13
P26	0,11	0,06	0,08

Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury na powierzchni pętli wewnątrz przegrody wystąpiła w pierwszej godzinie symulacji (Rys. 6.3). Temperatura na powierzchni pętli osiąga wartości najbardziej zbliżone do wyników symulacji w ostatnich godzinach obliczeń, wtedy również temperatura na powierzchni przegrody najbardziej różni się od uzyskanej z modelu: 0,07°C dla czujnika S_W_2 oraz 0,02°C dla czujnika S_Z_2 (Tablica 6.5).



Rys. 6.3. Przebieg wskazań czujników temperatury umieszczonych w osi symetrii na powierzchni warstw przegrody: betonu, styropianu oraz na powierzchni przewodów wewnątrz ściany otrzymanych z pomiarów doświadczalnych i wyznaczonych z modelu numerycznego dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Dla temperatury zasilania pętli równej 22°C wartość bezwzględna różnicy temperatury mieściła się w zakresie 0,04°C – 0,46°C (średnia), 0,05°C – 0,61°C (maksymalna) oraz 0,01°C – 0,41°C (minimalna) (Tablica 6.7). Największe rozbieżności zaobserwowano na powierzchni styropianu przy podłodze (czujniki: S_W_1 i S_Z_1). Dla czujników na powierzchni betonu wartości te nie były większe niż 0,19°C (maksymalna), 0,15°C (minimalna) oraz 0,16°C (średnia).

Tablica 6.7. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,17	0,15	0,16
B_W_02	0,08	0,06	0,07
B_W_03	0,05	0,04	0,05
B_W_04	0,08	0,05	0,07
B_W_05	0,06	0,04	0,05
B_W_06	0,09	0,08	0,08
B_W_07	0,07	0,06	0,07
B_W_08	0,05	0,04	0,05
B_W_09	0,08	0,07	0,07
B_W_10	0,08	0,06	0,07
B_W_11	0,12	0,11	0,11
B_W_12	0,06	0,04	0,04
B_W_13	0,08	0,05	0,06
B_W_14	0,19	0,09	0,12
B_Z_01	0,06	0,05	0,06
B_Z_02	0,07	0,04	0,06
B_Z_03	0,06	0,02	0,04
B_Z_04	0,08	0,05	0,06
B_Z_05	0,06	0,02	0,05
B_Z_06	0,08	0,06	0,07
B_Z_07	0,08	0,06	0,07
B_Z_08	0,08	0,06	0,07
B_Z_09	0,07	0,03	0,05
B_Z_10	0,06	0,03	0,05
B_Z_11	0,05	0,03	0,04
B_Z_12	0,08	0,07	0,08
B_Z_13	0,07	0,05	0,06
B_Z_14	0,13	0,06	0,07
S_W_1	0,45	0,23	0,30
S_W_2	0,14	0,01	0,06
S_W_3	0,26	0,01	0,17
S_Z_1	0,61	0,41	0,46
S_Z_2	0,28	0,06	0,13

Tablica 6.7. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
S_Z_3	0,15	0,01	0,10

W przypadku temperatury wewnątrz przegrody średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury nie przekroczyła 0,11°C (Tablica 6.8) i zanotowano ją dla czujnika P25. Dla tego samego czujnika wystąpiła największa: minimalna oraz maksymalna wartość bezwzględna różnicy, równa odpowiednio 0,09°C i 0,13°C.

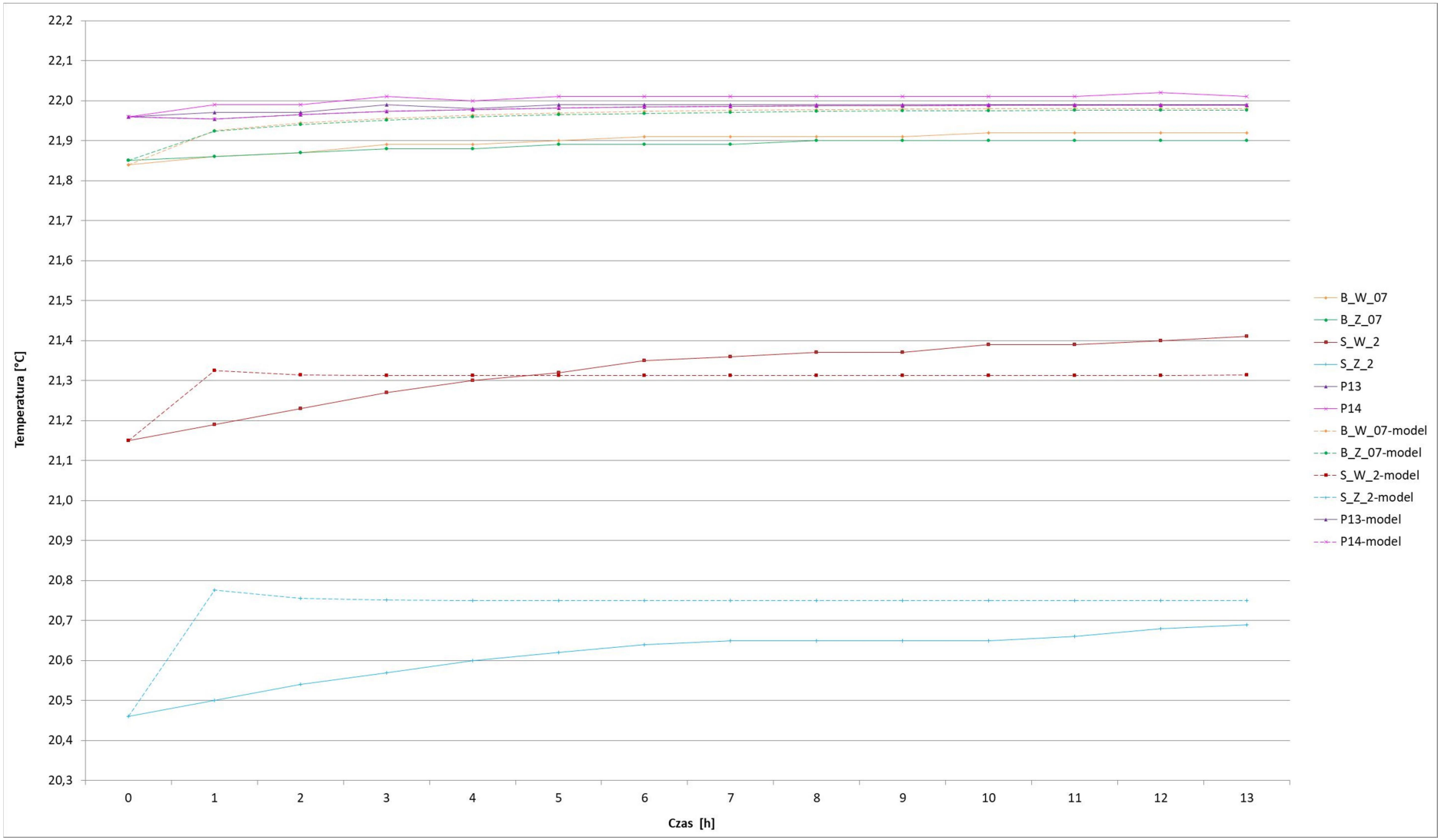
Tablica 6.8. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,03	0,01	0,02
P02	0,02	0,01	0,01
P03	0,01	0,00	0,01
P04	0,04	0,01	0,02
P05	0,03	0,01	0,02
P06	0,04	0,01	0,03
P07	0,05	0,02	0,03
P08	0,02	0,00	0,00
P09	0,02	0,00	0,01
P10	0,03	0,01	0,01
P11	0,03	0,01	0,01
P12	0,02	0,01	0,01
P13	0,02	0,00	0,01
P14	0,04	0,02	0,03
P15	0,03	0,00	0,01
P16	0,03	0,01	0,02
P17	0,03	0,00	0,02
P18	0,06	0,02	0,04
P19	0,04	0,01	0,02
P20	0,04	0,02	0,03
P21	0,03	0,01	0,02
P22	0,03	0,01	0,02
P23	0,03	0,00	0,02
P24	0,03	0,00	0,02
P25	0,13	0,09	0,11

Tablica 6.8. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P26	0,04	0,00	0,02

W odniesieniu do momentu wystąpienia danych wartości bezwzględnych różnicy temperatury, to ich maksymalne wartości zanotowano w pierwszych godzinach obliczeń numerycznych dla wszystkich czujników umieszczonych w osi symetrii przegrody (Rys. 6.4). W tym czasie dla czujnika S_Z_2 rozbieżność wyniosła 0,28°C, a w ostatniej godzinie symulacji wartość 0,06°C.



Rys. 6.4. Przebieg wskazań czujników temperatury umieszczonych w osi symetrii na powierzchni warstw przegrody: betonu, styropianu oraz na powierzchni przewodów wewnątrz ściany otrzymanych z pomiarów doświadczalnych i wyznaczonych z modelu numerycznego dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

W poniższej tablicy (Tablica 6.9) zestawiono wskaźniki RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu i styropianu. Maksymalne wartości wystąpiły dla czujnika S_Z_1 dla wszystkich analizowanych wariantów temperatury zasilania: 0,73°C dla 16°C, 0,41°C dla 18°C, 0,49°C dla 20°C oraz 0,47°C dla 22°C. W przypadku minimalnych wartości wyniosły one dla odpowiednich czujników i temperatury zasilania 16°C, 18°C, 20°C i 22°C: 0,04°C (B_Z_04), 0,02°C (B_W_02, B_W_04, B_W_05, B_W_06, B_07, B_W_12 i B_Z_08), 0,01°C (S_Z_2) oraz 0,04°C (B_Z_03 i B_Z_11). Dla czujników na powierzchni betonu od strony wewnętrznej (B_W) wartości RMSE mieściły się w przedziale: 0,06°C – 0,30°C dla 16°C, 0,02°C – 0,05°C dla 18°C, 0,02°C – 0,11°C dla 20°C oraz 0,05°C – 0,16°C dla 22°C. W przypadku czujników na powierzchni zewnętrznej betonu (B_Z) były to zakresy: 0,04°C – 0,27°C dla 16°C, 0,02°C – 0,08°C dla 18°C, 0,02°C – 0,07°C dla 20°C oraz 0,04°C – 0,08°C dla 22°C. Dla czujników zamontowanych na powierzchni styropianu w strefie wewnętrznej (S_W) zarejestrowano wartości RMSE: od 0,22°C do 0,66°C dla 16°C, od 0,11°C do 0,35°C dla 18°C, od 0,05°C do 0,43°C dla 20°C oraz od 0,07°C do 0,31°C dla 22°C. W kwestii czujników S_Z, czyli umieszczonych na powierzchni styropianu w strefie zewnętrznej wartości RMSE wyniosły: 0,24°C – 0,73°C dla 16°C, 0,08°C – 0,41°C dla 18°C, 0,01°C – 0,49°C dla 20°C oraz 0,11°C – 0,47°C dla 22°C.

Tablica 6.9. Zestawienie wartości RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Temperatura zasilania / Numer czujnika	16	18	20	22
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,10	0,04	0,11	0,16
B_W_02	0,07	0,02	0,04	0,07
B_W_03	0,06	0,03	0,04	0,05
B_W_04	0,07	0,02	0,03	0,07
B_W_05	0,08	0,02	0,03	0,05
B_W_06	0,06	0,02	0,04	0,08
B_W_07	0,07	0,02	0,05	0,07
B_W_08	0,07	0,03	0,05	0,05
B_W_09	0,06	0,03	0,03	0,07
B_W_10	0,08	0,03	0,06	0,07
B_W_11	0,06	0,04	0,07	0,11
B_W_12	0,07	0,02	0,02	0,05
B_W_13	0,08	0,03	0,04	0,06
B_W_14	0,30	0,05	0,02	0,13
B_Z_01	0,06	0,03	0,03	0,06
B_Z_02	0,05	0,05	0,06	0,06
B_Z_03	0,06	0,04	0,04	0,04
B_Z_04	0,04	0,04	0,06	0,06
B_Z_05	0,05	0,05	0,06	0,05
B_Z_06	0,05	0,04	0,05	0,07
B_Z_07	0,05	0,04	0,05	0,07

Tablica 6.9. c.d. Zestawienie wartości RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Temperatura zasilania / Numer czujnika	16	18	20	22
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
B_Z_08	0,06	0,02	0,03	0,07
B_Z_09	0,05	0,03	0,07	0,05
B_Z_10	0,05	0,03	0,03	0,05
B_Z_11	0,05	0,03	0,04	0,04
B_Z_12	0,06	0,05	0,06	0,08
B_Z_13	0,08	0,03	0,03	0,06
B_Z_14	0,27	0,08	0,02	0,08
S_W_1	0,66	0,35	0,43	0,31
S_W_2	0,22	0,15	0,05	0,07
S_W_3	0,44	0,11	0,12	0,19
S_Z_1	0,73	0,41	0,49	0,47
S_Z_2	0,24	0,08	0,01	0,14
S_Z_3	0,53	0,21	0,23	0,11

Dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wartości RMSE zawierały się w przedziale: 0,05°C – 0,29°C dla 16°C, 0,03°C – 0,13°C dla 18°C, 0,02°C – 0,13°C dla 20°C oraz 0,01°C – 0,12°C dla 22°C (Tablica 6.10). Najniższe wartości zanotowano dla czujników: P01, P03, P04 i P14 – razem 4 czujników dla 20°C, w przypadku pozostałych temperatur zasilania tylko czujnik P08 osiągnął wszystkie 3 najniższe wartości. Najwyższe wartości dotyczyły czujników: P25 dla wszystkich temperatur zasilania oprócz 16°C, wówczas wartość maksymalna odnosiła się do P26.

Tablica 6.10. Zestawienie wartości RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Temperatura zasilania / Numer czujnika	16	18	20	22
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,10	0,06	0,02	0,02
P02	0,08	0,07	0,04	0,01
P03	0,05	0,05	0,02	0,01
P04	0,07	0,05	0,02	0,02
P05	0,07	0,04	0,03	0,02
P06	0,08	0,04	0,03	0,03
P07	0,08	0,07	0,05	0,03
P08	0,05	0,03	0,03	0,01
P09	0,08	0,04	0,03	0,01
P10	0,09	0,06	0,04	0,02
P11	0,07	0,06	0,04	0,01
P12	0,07	0,05	0,04	0,01
P13	0,07	0,05	0,04	0,01

Tablica 6.10. c.d. Zestawienie wartości RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla etapu stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody

Temperatura zasilania / Numer czujnika	16	18	20	22
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
P14	0,09	0,04	0,02	0,03
P15	0,08	0,06	0,03	0,01
P16	0,08	0,07	0,04	0,02
P17	0,08	0,07	0,04	0,02
P18	0,10	0,07	0,04	0,04
P19	0,08	0,05	0,04	0,02
P20	0,11	0,08	0,05	0,03
P21	0,10	0,08	0,05	0,02
P22	0,11	0,07	0,04	0,02
P23	0,12	0,07	0,05	0,02
P24	0,13	0,07	0,05	0,03
P25	0,24	0,13	0,13	0,12
P26	0,29	0,12	0,08	0,02

6.2. Przebieg temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Do porównania wyników badań doświadczalnych z rezultatami otrzymanymi z modelu numerycznego dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej wykorzystano godzinową zmienność temperatury zewnętrznej w okresie 49 godzin.

Tablice: Tablica 6.11, Tablica 6.13, Tablica 6.15 oraz Tablica 6.17 dotyczą wartości bezwzględnych różnicy temperatury między wynikami otrzymanymi na drodze symulacji, a doświadczalnie dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej odpowiednio: 16°C, 18°C, 20°C oraz 22°C.

Rozbieżności dotyczące temperatury na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody również dla 4 wartości temperatury wlotowej czynnika zasilającego pętlę: 16°C, 18°C, 20°C oraz 22°C zestawiono w tablicach: Tablica 6.12, Tablica 6.14, Tablica 6.16 i Tablica 6.18.

Krzywe prezentujące zmienność temperatury dla czujników rozmieszczonych w osi symetrii: na powierzchni betonu od strony strefy wewnętrznej i zewnętrznej (B_W_07 i B_Z_07), na powierzchni styropianu w strefie wewnętrznej i zewnętrznej (S_W_2 i S_Z_2) oraz umieszczonych na powierzchni przewodów najbliżej osi symetrii (P13 i P14) przedstawiono na rysunkach dla danej temperatury wlotowej czynnika: Rys. 6.5 – Rys. 6.8.

Dla wariantu z temperaturą zasilania pętli równą 16°C średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury osiąga wartości z zakresu 0,01°C – 0,96°C (Tablica 6.11). Zwiększony przedział temperatury spowodowany został wyższymi wartościami bezwzględnymi różnicy temperatury: maksymalnej (0,03°C – 2,01°C) oraz minimalnej (0,00°C – 0,50°C). Wartości górne graniczne odnosiły się do czujników zamontowanych na powierzchni styropianu w strefie zewnętrznej stanowiska badawczego i ich wyższe wskazania powstały w wyniku

dostarczania powietrza zewnętrznego do wspomnianej już strefy powietrznej. W przypadku wartości bezwzględnej różnicy temperatury pod warstwą izolacji, a na powierzchni betonu zakresy te były węższe: 0,01°C – 0,06°C (średnia), 0,03°C – 0,24°C (maksymalna) oraz 0,00°C – 0,01°C (minimalna).

Tablica 6.11. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 16°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

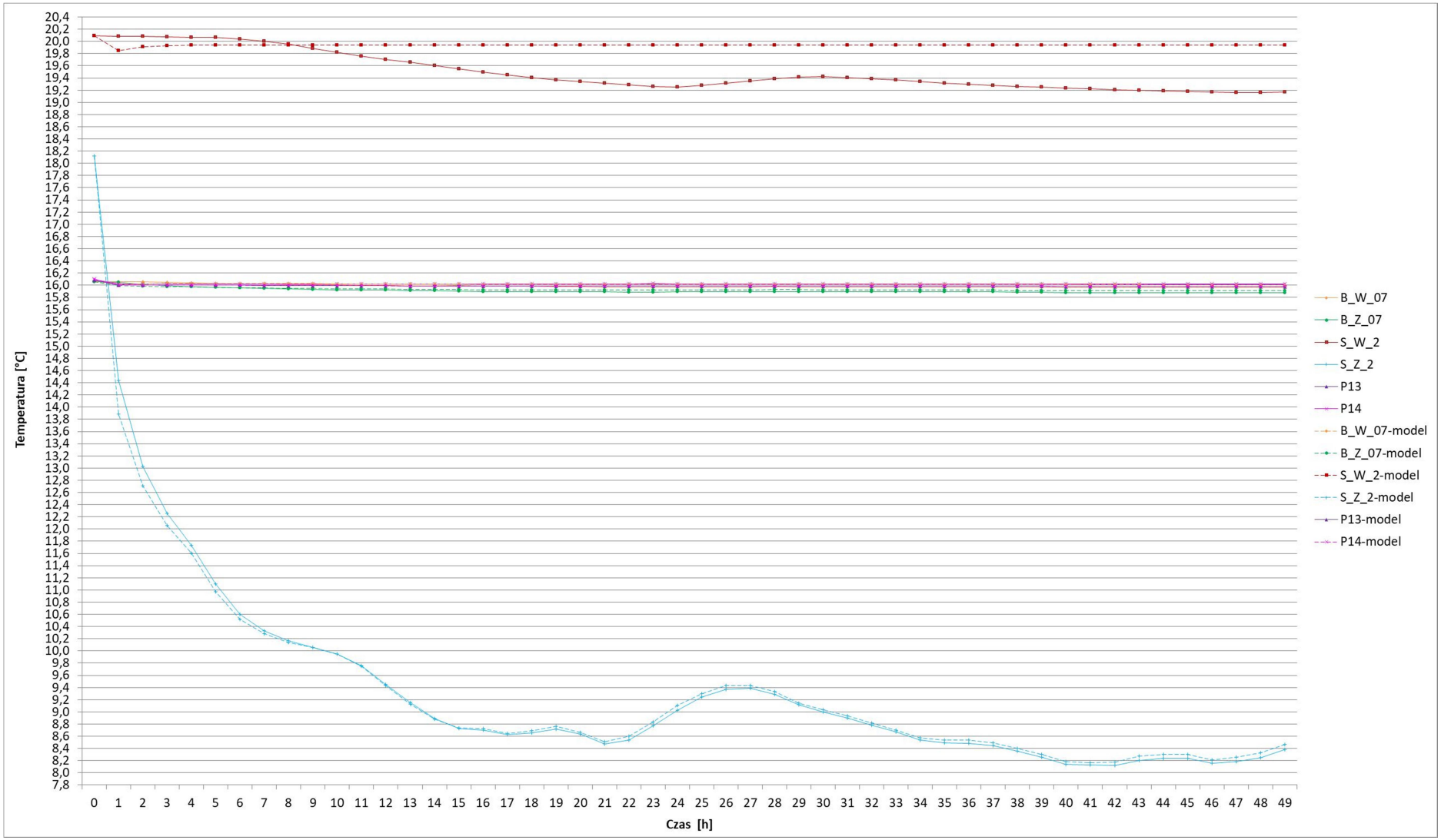
Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,08	0,00	0,04
B_W_02	0,06	0,00	0,02
B_W_03	0,08	0,01	0,06
B_W_04	0,05	0,00	0,02
B_W_05	0,07	0,00	0,02
B_W_06	0,05	0,00	0,04
B_W_07	0,05	0,00	0,03
B_W_08	0,05	0,00	0,04
B_W_09	0,06	0,00	0,05
B_W_10	0,06	0,00	0,02
B_W_11	0,07	0,01	0,06
B_W_12	0,06	0,00	0,04
B_W_13	0,07	0,01	0,05
B_W_14	0,24	0,00	0,05
B_Z_01	0,06	0,00	0,01
B_Z_02	0,04	0,00	0,04
B_Z_03	0,06	0,00	0,05
B_Z_04	0,03	0,00	0,02
B_Z_05	0,05	0,01	0,04
B_Z_06	0,08	0,01	0,06
B_Z_07	0,05	0,00	0,03
B_Z_08	0,07	0,00	0,01
B_Z_09	0,05	0,00	0,02
B_Z_10	0,05	0,00	0,04
B_Z_11	0,05	0,00	0,04
B_Z_12	0,07	0,00	0,05
B_Z_13	0,08	0,00	0,01
B_Z_14	0,22	0,01	0,05
S_W_1	1,20	0,29	0,96
S_W_2	0,78	0,01	0,50
S_W_3	0,97	0,04	0,69
S_Z_1	2,01	0,47	0,75
S_Z_2	0,55	0,00	0,06
S_Z_3	0,63	0,50	0,58

W przypadku czujników umieszczonych na powierzchni pętli wartości bezwzględne różnicy temperatury nie przekroczyły: 0,13°C dla wartości maksymalnej, 0,12°C dla średniej oraz 0,10°C dla wartości minimalnej (Tablica 6.12). Wszystkie 3 wyniki dotyczyły czujnika P25 zlokalizowanego w górnej części przegrody.

Tablica 6.12. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 16°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,10	0,04	0,05
P02	0,05	0,02	0,04
P03	0,03	0,00	0,02
P04	0,04	0,02	0,03
P05	0,05	0,02	0,04
P06	0,05	0,03	0,04
P07	0,05	0,02	0,04
P08	0,02	0,00	0,02
P09	0,06	0,03	0,05
P10	0,05	0,03	0,05
P11	0,05	0,02	0,04
P12	0,03	0,00	0,02
P13	0,04	0,01	0,03
P14	0,05	0,02	0,03
P15	0,05	0,03	0,04
P16	0,04	0,02	0,03
P17	0,04	0,02	0,04
P18	0,06	0,03	0,05
P19	0,04	0,02	0,03
P20	0,07	0,04	0,06
P21	0,04	0,02	0,03
P22	0,05	0,03	0,04
P23	0,06	0,03	0,05
P24	0,05	0,02	0,04
P25	0,13	0,10	0,12
P26	0,09	0,04	0,07

Największe rozbieżności między wynikami uzyskanymi z modelu i z pomiarów zauważono w pierwszej godzinie obliczeń dla wszystkich czujników umieszczonych na powierzchni w osi symetrii przegrody oprócz czujnika S_W_2, dla którego maksymalna wartość bezwzględna różnicy 0,78°C wystąpiła w ostatnich godzinach (48 godzina) (Rys. 6.5). Na taką wartość bezwzględną różnicy temperatury wpłynął spadek temperatury w strefie wewnętrznej równy 0,93°C. Dla temperatury w punktach pomiarowych P13 oraz P14 maksymalna wartość bezwzględna różnicy nie przekroczyła 0,05°C przez cały okres analiz.



Rys. 6.5. Przebieg wskazań czujników temperatury umieszczonych w osi symetrii na powierzchni warstw przegrody: betonu, styropianu oraz na powierzchni przewodów wewnątrz ściany otrzymanych z pomiarów doświadczalnych i wyznaczonych z modelu numerycznego dla temperatury zasilania pętli równej 16°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury dla opcji z temperaturą zasilania równą 18°C wynosiła od 0,04°C do 1,99°C, minimalna natomiast od 0,00°C do 0,51°C, a średnia od 0,02°C do 1,04°C (Tablica 6.13). Najwyższe wartości dotyczą punktów pomiarowych na powierzchni styropianu: S_Z_1 (dla maksimum), S_Z_3 (dla minimum) oraz S_W_1 (dla średniej). W przypadku powierzchni betonu maksymalna wartość różnicy temperatury nie przekroczyła 0,14°C, minimalna 0,03°C, a średnia 0,12°C.

Tablica 6.13. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,14	0,03	0,12
B_W_02	0,07	0,00	0,05
B_W_03	0,07	0,01	0,06
B_W_04	0,06	0,00	0,05
B_W_05	0,05	0,00	0,03
B_W_06	0,06	0,00	0,05
B_W_07	0,06	0,00	0,04
B_W_08	0,07	0,00	0,06
B_W_09	0,06	0,00	0,05
B_W_10	0,07	0,00	0,06
B_W_11	0,08	0,02	0,07
B_W_12	0,06	0,00	0,04
B_W_13	0,08	0,00	0,07
B_W_14	0,13	0,00	0,07
B_Z_01	0,04	0,01	0,03
B_Z_02	0,06	0,03	0,05
B_Z_03	0,05	0,02	0,04
B_Z_04	0,05	0,01	0,05
B_Z_05	0,07	0,03	0,06
B_Z_06	0,08	0,01	0,07
B_Z_07	0,06	0,01	0,05
B_Z_08	0,04	0,00	0,03
B_Z_09	0,06	0,00	0,05
B_Z_10	0,05	0,00	0,04
B_Z_11	0,05	0,01	0,05
B_Z_12	0,08	0,02	0,07
B_Z_13	0,04	0,00	0,02
B_Z_14	0,13	0,00	0,04
S_W_1	1,21	0,48	1,04
S_W_2	0,50	0,02	0,35
S_W_3	0,76	0,08	0,58
S_Z_1	1,99	0,50	0,73
S_Z_2	0,41	0,01	0,10

Tablica 6.13. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
S_Z_3	0,70	0,51	0,60

W poniższej tablicy (Tablica 6.14) zestawiono wyniki rozbieżności dla czujników zlokalizowanych na powierzchni przegrody. Największa wartość bezwzględna różnicy pojawiła się dla czujnika P25: 0,11°C dla wartości średniej, natomiast dla wartości maksymalnej i minimalnej odpowiednio: 0,17°C i 0,10°C.

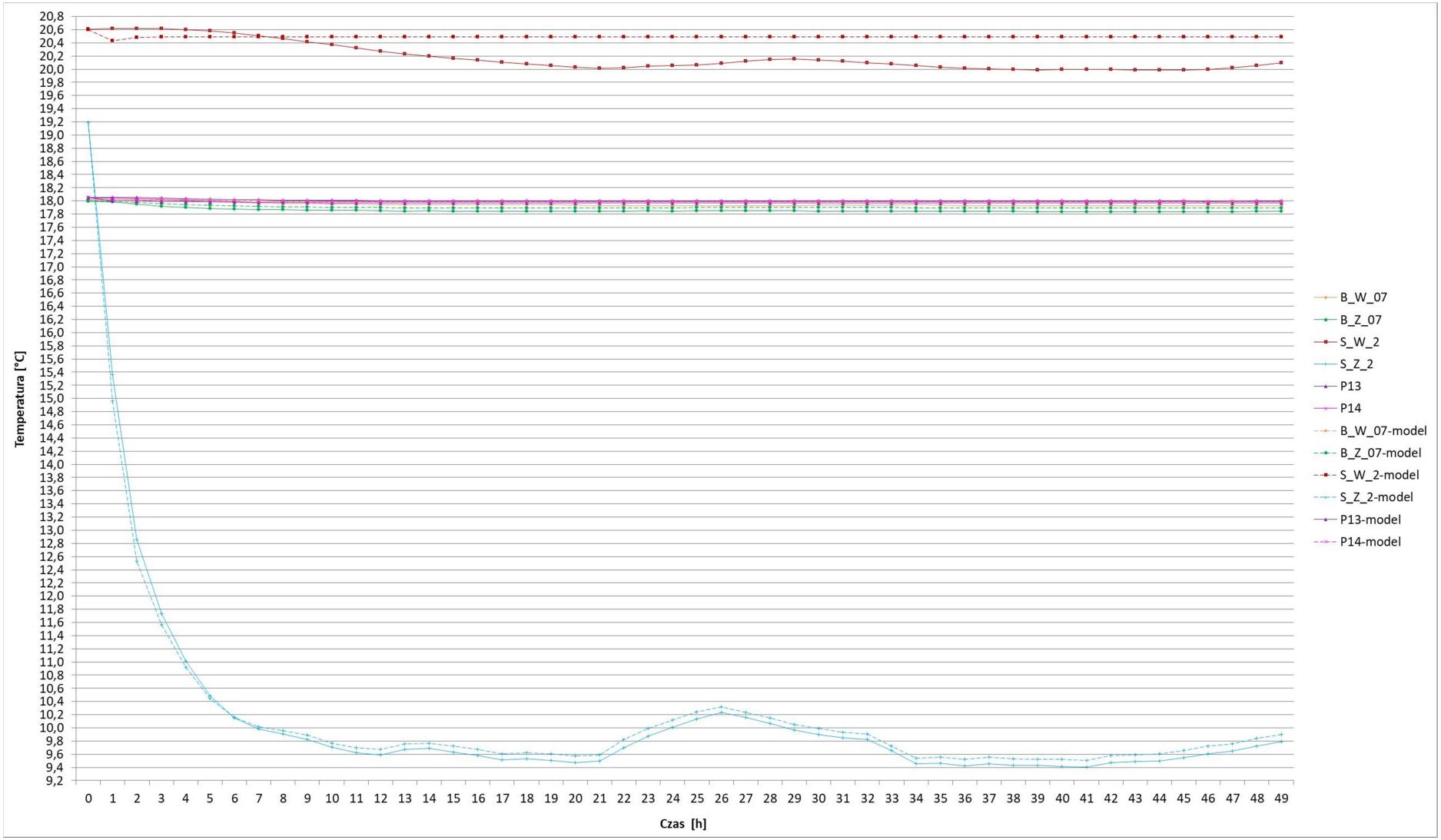
Tablica 6.14. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,04	0,00	0,01
P02	0,05	0,04	0,04
P03	0,03	0,02	0,02
P04	0,04	0,02	0,03
P05	0,03	0,01	0,01
P06	0,03	0,01	0,02
P07	0,06	0,04	0,04
P08	0,03	0,00	0,01
P09	0,03	0,01	0,02
P10	0,06	0,04	0,04
P11	0,06	0,03	0,04
P12	0,04	0,02	0,02
P13	0,05	0,03	0,03
P14	0,04	0,02	0,02
P15	0,05	0,03	0,03
P16	0,07	0,04	0,05
P17	0,06	0,03	0,04
P18	0,06	0,04	0,04
P19	0,04	0,02	0,02
P20	0,07	0,04	0,05
P21	0,08	0,05	0,06
P22	0,07	0,03	0,04
P23	0,07	0,03	0,04
P24	0,08	0,04	0,04
P25	0,17	0,10	0,11

Tablica 6.14. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P26	0,16	0,03	0,06

Odnośnie godziny, w której zanotowano największe wartości bezwzględne różnicy między wartościami z pomiarów, a z obliczeń, to dla czujników wewnątrz przegrody i najbliżej jej osi symetrii była to pierwsza godzina symulacji, podobnie jak dla punktu pomiarowego na powierzchni styropianu w strefie zewnętrznej (Rys. 6.6). Dla czujnika na powierzchni styropianu w strefie wewnętrznej największa rozbieżność wystąpiła o 44 godzinie i wyniosła 0,50°C. Powodem tego był spadek temperatury w strefie powietrznej o 0,61°C.



Rys. 6.6. Przebieg wskazań czujników temperatury umieszczonych w osi symetrii na powierzchni warstw przegrody: betonu, styropianu oraz na powierzchni przewodów wewnątrz ściany otrzymanych z pomiarów doświadczalnych i wyznaczonych z modelu numerycznego dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

W przypadku temperatury zasilania pętli równej 20°C na powierzchni styropianu zarejetrowano największe wartości bezwzględne różnicy temperatury dla czujników: S_W_1 (0,97°C – wartość średnia), S_Z_1 (1,89°C – wartość maksymalna) oraz S_Z_3 (0,64°C – wartość minimalna) (Tablica 6.15). Dla punktów pomiarowych na powierzchni betonu wartość bezwzględna różnicy temperatury nie była wyższa niż 0,19°C dla maksymalnej, dla minimalnej 0,11°C, a dla średniej 0,17°C.

Tablica 6.15. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,19	0,11	0,17
B_W_02	0,09	0,04	0,07
B_W_03	0,06	0,03	0,05
B_W_04	0,07	0,02	0,06
B_W_05	0,06	0,02	0,05
B_W_06	0,08	0,04	0,06
B_W_07	0,08	0,04	0,07
B_W_08	0,08	0,03	0,07
B_W_09	0,06	0,02	0,05
B_W_10	0,10	0,05	0,08
B_W_11	0,11	0,06	0,09
B_W_12	0,05	0,01	0,04
B_W_13	0,08	0,03	0,07
B_W_14	0,16	0,00	0,11
B_Z_01	0,05	0,03	0,04
B_Z_02	0,08	0,05	0,06
B_Z_03	0,05	0,03	0,04
B_Z_04	0,09	0,07	0,08
B_Z_05	0,07	0,06	0,07
B_Z_06	0,10	0,06	0,09
B_Z_07	0,08	0,05	0,07
B_Z_08	0,07	0,03	0,06
B_Z_09	0,10	0,07	0,09
B_Z_10	0,06	0,03	0,05
B_Z_11	0,08	0,04	0,07
B_Z_12	0,09	0,06	0,08
B_Z_13	0,06	0,03	0,06
B_Z_14	0,14	0,00	0,11
S_W_1	1,23	0,47	0,97
S_W_2	0,68	0,02	0,37
S_W_3	0,83	0,12	0,55
S_Z_1	1,89	0,56	0,78
S_Z_2	0,41	0,00	0,13

Tablica 6.15. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
S_Z_3	0,82	0,64	0,74

Dla czujników na powierzchni przewodów wewnątrz przegrody wartość bezwzględna różnicy temperatury mieściła się w zakresie 0,00°C – 0,08°C (średnia), 0,01°C – 0,13°C (maksymalna) oraz 0,00°C – 0,07°C (minimalna) (Tablica 6.16). Najwyższe wartości z rozpisanych przedziałów dotyczą czujnika P25.

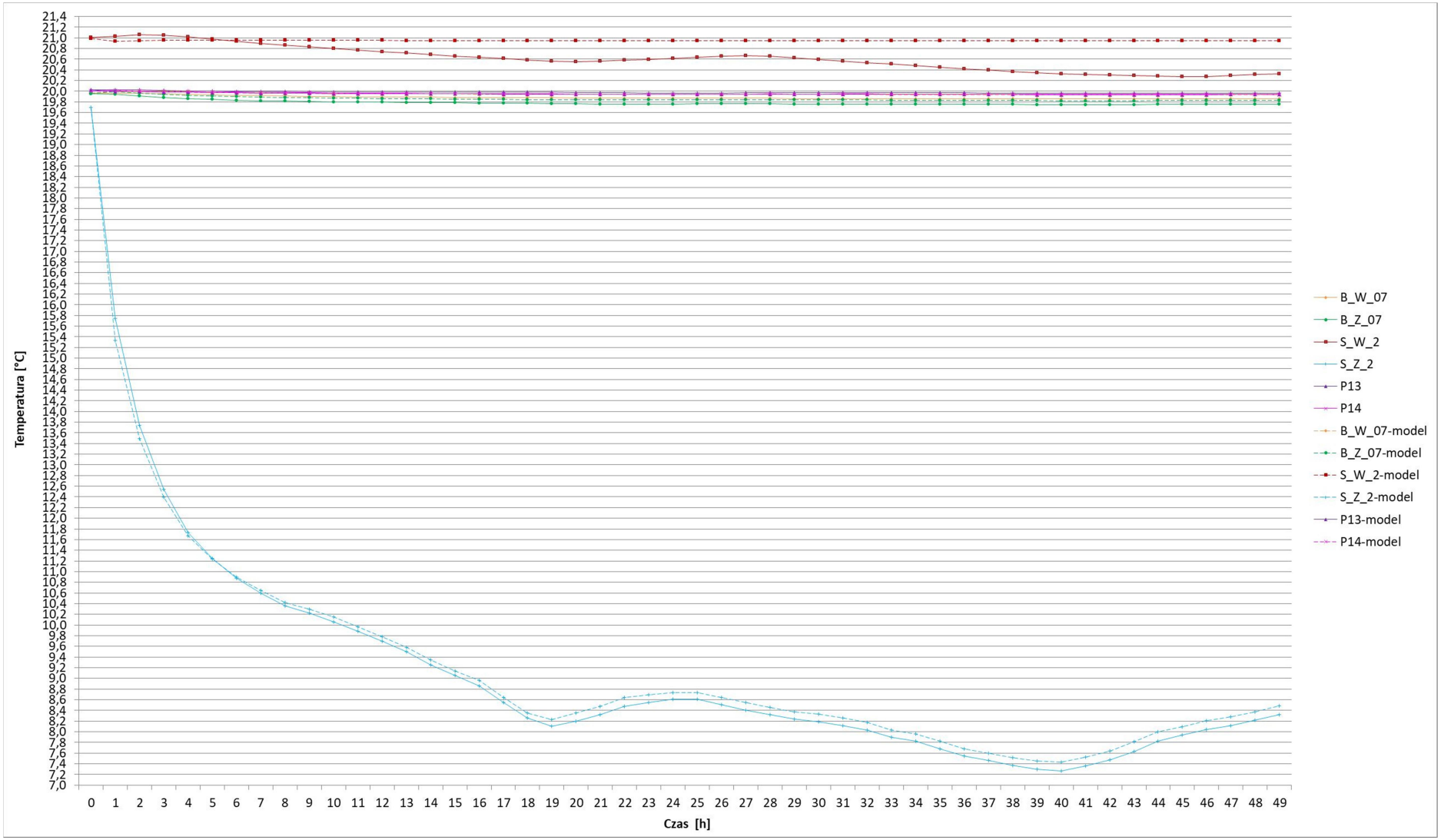
Tablica 6.16. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,02	0,00	0,01
P02	0,03	0,02	0,03
P03	0,02	0,00	0,01
P04	0,02	0,01	0,01
P05	0,02	0,01	0,01
P06	0,02	0,01	0,02
P07	0,04	0,03	0,04
P08	0,03	0,01	0,02
P09	0,02	0,01	0,02
P10	0,03	0,02	0,03
P11	0,03	0,02	0,03
P12	0,03	0,01	0,02
P13	0,04	0,02	0,03
P14	0,01	0,00	0,00
P15	0,02	0,01	0,02
P16	0,04	0,02	0,03
P17	0,04	0,02	0,03
P18	0,03	0,01	0,02
P19	0,03	0,01	0,02
P20	0,04	0,01	0,02
P21	0,04	0,01	0,02
P22	0,04	0,00	0,02
P23	0,04	0,00	0,02
P24	0,04	0,00	0,01
P25	0,13	0,07	0,08

Tablica 6.16. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P26	0,08	0,00	0,02

W pierwszej godzinie symulacji w przypadku czujników zamontowanych w osi symetrii bądź najbliżej niej największe wartości bezwzględne różnicy temperatury zarejestrowano dla czujnika S_Z_2 (0,41°C) oraz dla czujnika na powierzchni pętli P14 (0,01°C) (Rys. 6.7). W przypadku czujnika na powierzchni styropianu w strefie wewnętrznej S_W_2 maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury wyniosła w 45 godzinie obliczeń 0,68°C, co było wynikiem spadku temperatury w strefie wewnętrznej o 0,71°C.



Rys. 6.7. Przebieg wskazań czujników temperatury umieszczonych w osi symetrii na powierzchni warstw przegrody: betonu, styropianu oraz na powierzchni przewodów wewnątrz ściany otrzymanych z pomiarów doświadczalnych i wyznaczonych z modelu numerycznego dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury w sytuacji zasilania pętli czynnikiem o temperaturze 22°C mieściła się w przedziale 0,06°C – 2,02°C, minimalna 0,00°C – 0,50°C, natomiast średnia od 0,03°C do 0,64°C (Tablica 6.17). Najwyższe wartości z opisanych zakresów dotyczą punktów pomiarowych na powierzchni styropianu w strefie zewnętrznej: S_Z_1 (maksymalna i średnia) oraz S_Z_3 (minimalna). W przypadku powierzchni betonu zakresy wartości bezwzględnej różnicy temperatury wyniosły: 0,06°C – 0,20°C (maksimum), 0,03°C – 0,18°C (średnia) oraz 0,02°C – 0,17°C (minimum).

Tablica 6.17. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,20	0,17	0,18
B_W_02	0,08	0,06	0,07
B_W_03	0,06	0,04	0,05
B_W_04	0,08	0,05	0,07
B_W_05	0,06	0,04	0,05
B_W_06	0,10	0,07	0,08
B_W_07	0,08	0,05	0,06
B_W_08	0,06	0,04	0,05
B_W_09	0,07	0,06	0,07
B_W_10	0,08	0,06	0,07
B_W_11	0,13	0,10	0,11
B_W_12	0,06	0,04	0,05
B_W_13	0,08	0,06	0,07
B_W_14	0,17	0,09	0,14
B_Z_01	0,10	0,04	0,06
B_Z_02	0,10	0,04	0,05
B_Z_03	0,07	0,02	0,03
B_Z_04	0,10	0,06	0,07
B_Z_05	0,08	0,04	0,05
B_Z_06	0,11	0,08	0,09
B_Z_07	0,10	0,07	0,08
B_Z_08	0,10	0,07	0,08
B_Z_09	0,08	0,06	0,07
B_Z_10	0,07	0,04	0,05
B_Z_11	0,07	0,05	0,06
B_Z_12	0,10	0,07	0,08
B_Z_13	0,09	0,06	0,07
B_Z_14	0,13	0,08	0,11
S_W_1	0,69	0,37	0,53
S_W_2	0,24	0,00	0,11
S_W_3	0,20	0,01	0,11
S_Z_1	2,02	0,36	0,64

Tablica 6.17. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
S_Z_2	0,38	0,01	0,13
S_Z_3	0,77	0,50	0,60

Dla temperatury na powierzchni przewodów średnia wartość bezwzględna różnicy wynosiła od 0,01°C do 0,10°C (Tablica 6.18). W przypadku wartości ekstremalnych osiągnęła wartości z zakresu 0,01°C – 0,11°C (maksymalna) oraz 0,00°C – 0,09°C (minimalna).

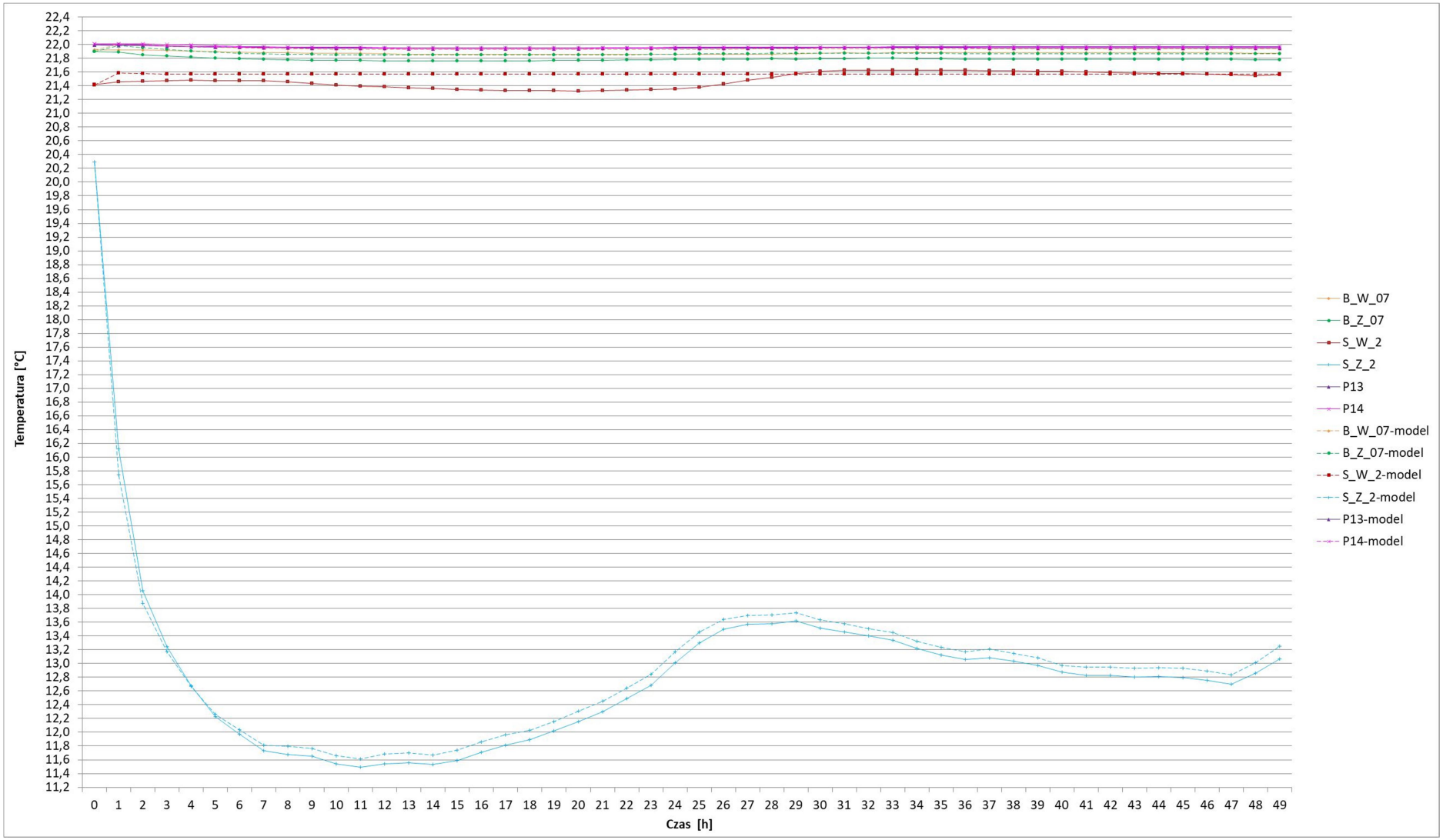
Tablica 6.18. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,04	0,01	0,02
P02	0,03	0,00	0,02
P03	0,02	0,00	0,01
P04	0,03	0,01	0,02
P05	0,02	0,00	0,02
P06	0,03	0,01	0,02
P07	0,04	0,02	0,03
P08	0,01	0,00	0,01
P09	0,02	0,00	0,01
P10	0,02	0,00	0,02
P11	0,02	0,00	0,02
P12	0,02	0,00	0,01
P13	0,01	0,00	0,01
P14	0,02	0,01	0,02
P15	0,01	0,00	0,01
P16	0,02	0,01	0,02
P17	0,02	0,00	0,01
P18	0,04	0,03	0,03
P19	0,02	0,01	0,01
P20	0,03	0,02	0,02
P21	0,02	0,00	0,01
P22	0,02	0,01	0,01
P23	0,01	0,00	0,01
P24	0,02	0,00	0,01

Tablica 6.18. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P25	0,11	0,09	0,10
P26	0,03	0,00	0,02

Dla czujników umieszczonych w osi symetrii przegrody największą rozbieżność zarejestrowano w punkcie pomiarowym S_Z_2 w pierwszej godzinie obliczeń (Rys. 6.8). W przypadku czujnika na powierzchni styropianu w strefie wewnętrznej S_W_2 maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury wystąpiła w 20 godzinie symulacji.



Rys. 6.8. Przebieg wskazań czujników temperatury umieszczonych w osi symetrii na powierzchni warstw przegrody: betonu, styropianu oraz na powierzchni przewodów wewnątrz ściany otrzymanych z pomiarów doświadczalnych i wyznaczonych z modelu numerycznego dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu wartości RMSE osiągnęły wartości od 0,01°C do 0,99°C dla temperatury zasilania 16°C, od 0,02°C do 1,05°C dla temperatury zasilania 18°C, od 0,04°C do 0,99°C dla temperatury zasilania 20°C oraz od 0,03°C do 0,71°C dla temperatury zasilania 22°C (Tablica 6.19). Dla 3 pierwszych temperatur zasilania wartości maksymalne odnosiły się do punktu pomiarowego S_W_1, dla 22°C był to wynik dla S_Z_1. Wartości minimalne zanotowano dla: B_Z_01 (dla 16°C), B_Z_13 (dla 18°C), B_W_12, B_Z_01 i B_Z_03 (dla 20°C) oraz B_Z_03 (dla 22°C). Przypisując do poszczególnych lokalizacji czujników, dla powierzchni betonu od strony wewnętrznej wartości RMSE mieściły się w zakresach: 0,02°C – 0,07°C dla 16°C, 0,04°C – 0,12°C dla 18°C, 0,04°C – 0,17°C dla 20°C oraz 0,05°C – 0,18°C dla 22°C. W przypadku strony zewnętrznej na powierzchni betonu były to wartości: 0,01°C – 0,07°C dla 16°C, 0,02°C – 0,07°C dla 18°C, 0,04°C – 0,11°C dla 20°C oraz 0,03°C – 0,11°C dla 22°C. Powierzchnia styropianu charakterowała się natomiast przedziałami wartości RMSE: dla 16°C 0,55°C – 0,99°C (S_W) oraz 0,11°C – 0,79°C (S_Z), dla 18°C 0,38°C – 1,05°C (S_W) oraz 0,12°C – 0,79°C (S_Z), dla 20°C 0,42°C – 0,99°C (S_W) oraz 0,15°C – 0,82°C (S_Z), dla 22°C 0,12°C – 0,54°C (S_W) oraz 0,14°C – 0,71°C (S_Z).

Tablica 6.19. Zestawienie wartości RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Temperatura zasilania / Numer czujnika	16	18	20	22
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,04	0,12	0,17	0,18
B_W_02	0,03	0,06	0,07	0,07
B_W_03	0,07	0,06	0,05	0,05
B_W_04	0,03	0,05	0,06	0,07
B_W_05	0,02	0,04	0,05	0,05
B_W_06	0,04	0,05	0,06	0,08
B_W_07	0,03	0,05	0,07	0,06
B_W_08	0,04	0,06	0,07	0,05
B_W_09	0,05	0,05	0,05	0,07
B_W_10	0,03	0,06	0,08	0,07
B_W_11	0,06	0,07	0,10	0,11
B_W_12	0,05	0,04	0,04	0,05
B_W_13	0,06	0,07	0,07	0,07
B_W_14	0,07	0,07	0,12	0,15
B_Z_01	0,01	0,03	0,04	0,06
B_Z_02	0,04	0,05	0,06	0,06
B_Z_03	0,05	0,04	0,04	0,03
B_Z_04	0,02	0,05	0,08	0,07
B_Z_05	0,04	0,06	0,07	0,05
B_Z_06	0,06	0,07	0,09	0,09
B_Z_07	0,03	0,05	0,07	0,08
B_Z_08	0,02	0,03	0,06	0,08
B_Z_09	0,02	0,05	0,09	0,07

Tablica 6.19. c.d. Zestawienie wartości RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Temperatura zasilania / Numer czujnika	16	18	20	22
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
B_Z_10	0,04	0,05	0,05	0,05
B_Z_11	0,04	0,05	0,07	0,06
B_Z_12	0,06	0,07	0,08	0,08
B_Z_13	0,02	0,02	0,06	0,07
B_Z_14	0,07	0,04	0,11	0,11
S_W_1	0,99	1,05	0,99	0,54
S_W_2	0,55	0,38	0,42	0,14
S_W_3	0,75	0,61	0,59	0,12
S_Z_1	0,79	0,79	0,82	0,71
S_Z_2	0,11	0,12	0,15	0,14
S_Z_3	0,58	0,60	0,74	0,60

Wyznaczone wskaźniki RMSE osiągnęły wartości maksymalne dla 1 czujnika P25 dla wszystkich temperatur zasilania i były to wartości: 0,12°C, 0,11°C, 0,09°C oraz 0,10°C (Tablica 6.20). Wartości minimalne wskazano dla czujników dla danej temperatury zasilania: P03, P08 i P12 – 3 czujniki dla 16°C (0,02°C) również 3 czujniki dla 18°C: P01, P05 i P08 (0,01°C), P01, P03, P04, P05 i P14 – razem 5 czujników dla 20°C (0,01°C) oraz P03, P08, P09, P12, P13, P15, P17, P19, P21, P23 i P24 – łącznie 11 czujników dla 22°C (0,01°C).

Tablica 6.20. Zestawienie wartości RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Temperatura zasilania / Numer czujnika	16	18	20	22
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,05	0,01	0,01	0,02
P02	0,04	0,04	0,03	0,02
P03	0,02	0,02	0,01	0,01
P04	0,04	0,03	0,01	0,02
P05	0,04	0,01	0,01	0,02
P06	0,05	0,02	0,02	0,02
P07	0,04	0,04	0,04	0,03
P08	0,02	0,01	0,02	0,01
P09	0,05	0,02	0,02	0,01
P10	0,05	0,04	0,03	0,02
P11	0,04	0,04	0,03	0,02
P12	0,02	0,02	0,02	0,01
P13	0,03	0,03	0,03	0,01
P14	0,04	0,02	0,01	0,02
P15	0,04	0,03	0,02	0,01
P16	0,04	0,05	0,03	0,02

Tablica 6.20. c.d. Zestawienie wartości RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla etapu przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni

Temperatura zasilania / Numer czujnika	16	18	20	22
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
P17	0,04	0,04	0,03	0,01
P18	0,05	0,04	0,02	0,03
P19	0,03	0,02	0,02	0,01
P20	0,06	0,05	0,03	0,03
P21	0,04	0,06	0,02	0,01
P22	0,05	0,04	0,02	0,02
P23	0,05	0,04	0,02	0,01
P24	0,04	0,04	0,02	0,01
P25	0,12	0,11	0,09	0,10
P26	0,07	0,06	0,03	0,02

6.3. Wymuszenie skokowe temperatury zewnętrznej

Kolejna część porównania badań doświadczalnych z modelem numerycznym dotyczyła wariantu z wymuszeniem skokowym temperatury zewnętrznej przez czas 23 godzin. Zmienną temperaturę zewnętrzną uzyskano podgrzewając powietrze nawiewane tak, aby w strefie zewnętrznej otrzymać temperaturę o przynajmniej 10°C wyższą niż w temperatura w strefie wewnętrznej.

Wyniki wartości bezwzględnych różnicy temperatury otrzymanej z symulacji, a zmierzonej podczas badań doświadczalnych dla danej lokalizacji punktu pomiarowego zestawiono w tablicach: Tablica 6.21 – Tablica 6.28. Tablica 6.21, Tablica 6.23, Tablica 6.25 oraz Tablica 6.27 została sporządzona dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu i styropianu. Wyniki dla czujników na powierzchni przewodów przedstawiono w tablicach: Tablica 6.22, Tablica 6.24, Tablica 6.26 oraz Tablica 6.28.

Dla czujników umieszczonych w osi symetrii przegrody na powierzchni betonu (B_W_07 i B_Z_07) oraz styropianu (S_W_2 i S_Z_2) także dla czujników zlokalizowanych na powierzchni przewodów tworzywowych najbliżej osi symetrii (P13 i P14) zilustrowano zmienność temperatury (Rys. 6.9 – Rys. 6.12).

Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury dla temperatury zasilania pętli równej 16°C mieściła się w zakresie 0,01°C – 1,37°C (Tablica 6.21). Wartości ekstremalne osiągnęły poziom: 0,00°C – 0,76°C (minimum) oraz 0,02°C – 5,44°C (maksimum). 3 najwyższe wartości w wymienionych parametrach dotyczyły czujnika S_Z_1.

Tablica 6.21. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 16°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

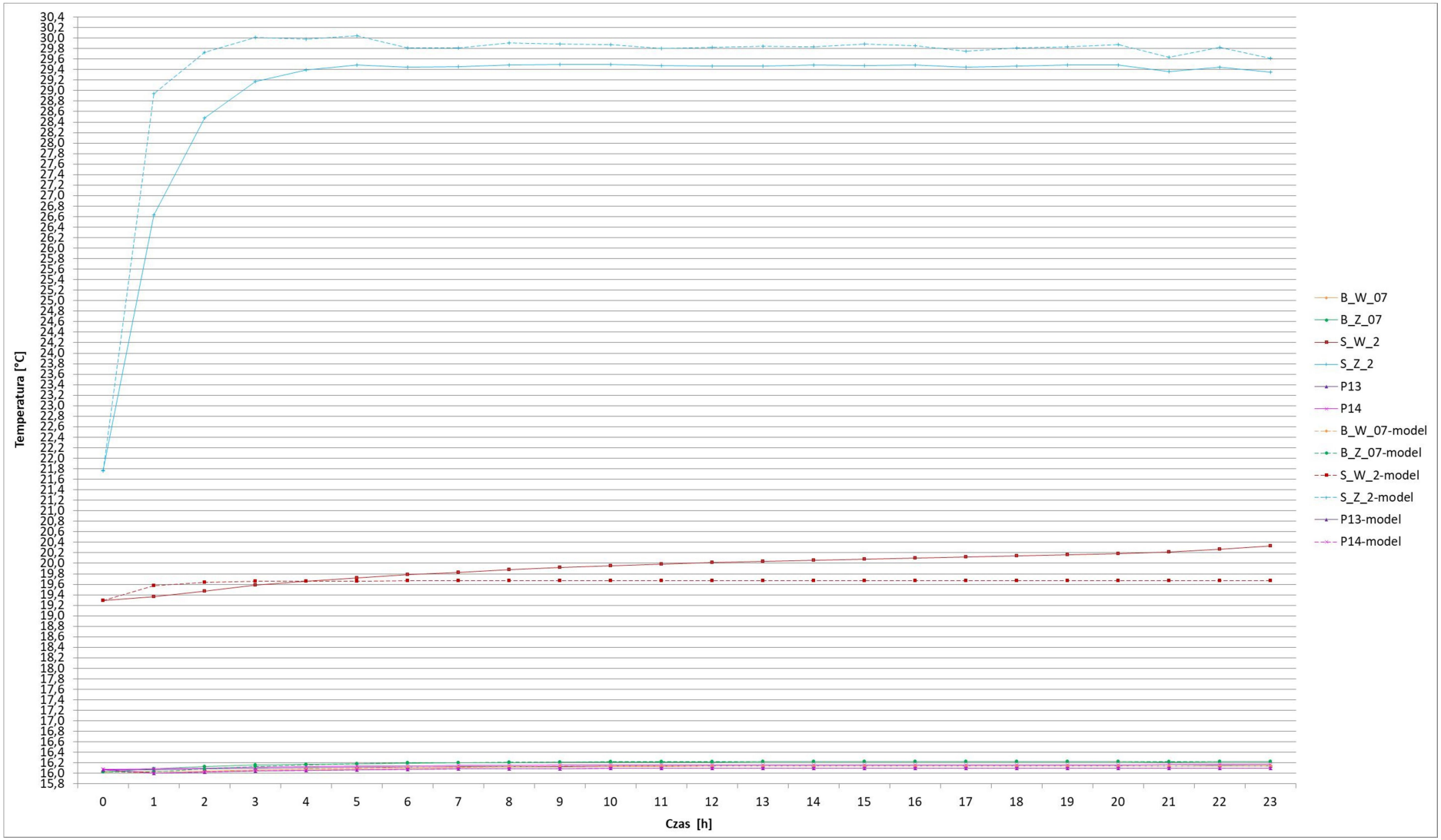
Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,06	0,00	0,01
B_W_02	0,04	0,00	0,01
B_W_03	0,06	0,01	0,05
B_W_04	0,03	0,00	0,01
B_W_05	0,05	0,00	0,01
B_W_06	0,02	0,00	0,02
B_W_07	0,02	0,00	0,01
B_W_08	0,02	0,00	0,01
B_W_09	0,03	0,00	0,02
B_W_10	0,04	0,00	0,02
B_W_11	0,04	0,01	0,03
B_W_12	0,02	0,00	0,01
B_W_13	0,03	0,00	0,01
B_W_14	0,27	0,13	0,22
B_Z_01	0,06	0,01	0,04
B_Z_02	0,10	0,00	0,08
B_Z_03	0,09	0,00	0,07
B_Z_04	0,04	0,00	0,02
B_Z_05	0,05	0,00	0,04
B_Z_06	0,04	0,00	0,01
B_Z_07	0,06	0,00	0,01
B_Z_08	0,08	0,02	0,03
B_Z_09	0,06	0,01	0,02
B_Z_10	0,04	0,01	0,02
B_Z_11	0,06	0,00	0,01
B_Z_12	0,04	0,01	0,03
B_Z_13	0,10	0,04	0,05
B_Z_14	0,27	0,19	0,24
S_W_1	0,85	0,00	0,46
S_W_2	0,66	0,00	0,33
S_W_3	1,15	0,32	0,74
S_Z_1	5,44	0,76	1,37
S_Z_2	2,31	0,26	0,52
S_Z_3	1,12	0,54	0,63

W sytuacji umieszczenia czujników na powierzchni pętli czujnik zlokalizowany najwyżej, czyli P26 charakteryzował się najwyższymi wartościami bezwzględnymi różnicy temperatury: 0,29°C (wartość maksymalna), 0,25°C (wartość średnia) oraz 0,18°C (wartość minimalna) (Tablica 6.22). Dla pozostałych czujników wartości te przekroczyły bądź były równe: 0,05°C (wartość maksymalna), 0,02°C (wartość średnia), 0,01°C (wartość minimalna).

Tablica 6.22. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 16°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,10	0,04	0,05
P02	0,08	0,04	0,05
P03	0,05	0,01	0,02
P04	0,07	0,03	0,04
P05	0,07	0,04	0,05
P06	0,08	0,05	0,06
P07	0,08	0,05	0,06
P08	0,05	0,01	0,02
P09	0,08	0,05	0,06
P10	0,08	0,06	0,06
P11	0,07	0,05	0,05
P12	0,06	0,04	0,05
P13	0,07	0,04	0,05
P14	0,08	0,06	0,07
P15	0,08	0,06	0,06
P16	0,08	0,06	0,06
P17	0,08	0,06	0,06
P18	0,09	0,07	0,08
P19	0,08	0,06	0,06
P20	0,11	0,09	0,10
P21	0,09	0,07	0,08
P22	0,10	0,09	0,09
P23	0,10	0,09	0,10
P24	0,12	0,10	0,11
P25	0,21	0,17	0,19
P26	0,29	0,18	0,25

Analizując przebieg godzinowy wyników obliczeń z modelu oraz wartości pomiarów dla czujników zamocowanych w osi symetrii bądź najbliżej niej zauważono, że największe rozbieżności wystąpiły w pierwszej godzinie symulacji, oprócz czujnika S_W_2 (Rys. 6.9). W tym przypadku w związku ze wzrostem temperatury wewnątrz strefy powietrznej o 0,99°C podczas pomiarów oraz założeniem w modelu stałej temperatury w strefie wewnętrznej rozbieżność o godzinie 23 osiągnęła maksymalną wartość bezwzględną różnicy temperatury równą 0,66°C.



Rys. 6.9. Przebieg wskazań czujników temperatury umieszczonych w osi symetrii na powierzchni warstw przegrody: betonu, styropianu oraz na powierzchni przewodów wewnątrz ściany otrzymanych z pomiarów doświadczalnych i wyznaczonych z modelu numerycznego dla temperatury zasilania pętli równej 16°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Dla temperatury zasilania pętli równej 18°C wartość bezwzględna różnicy temperatury osiągnęła wartości w przedziale: 0,02°C – 5,40°C (maksimum), 0,01°C – 1,59°C (średnia), 0,00°C – 0,99°C (minimum) (Tablica 6.23). Dla punktów pomiarowych zlokalizowanych na powierzchni styropianu w strefie zewnętrznej zanotowano największe wartości bezwzględne różnicy temperatury, dla punktu S_Z_1 osiągnięto górne wartości wszystkich zakresów. Dla czujników na powierzchni betonu przedziały się zmniejszyły: 0,02°C – 0,15°C (maksimum), 0,01°C – 0,13°C (średnia), 0,00°C – 0,07°C (minimum).

Tablica 6.23. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,08	0,06	0,07
B_W_02	0,04	0,02	0,03
B_W_03	0,06	0,03	0,05
B_W_04	0,03	0,02	0,02
B_W_05	0,02	0,00	0,01
B_W_06	0,04	0,02	0,03
B_W_07	0,03	0,02	0,03
B_W_08	0,03	0,02	0,02
B_W_09	0,04	0,02	0,03
B_W_10	0,03	0,02	0,02
B_W_11	0,05	0,04	0,05
B_W_12	0,02	0,00	0,01
B_W_13	0,03	0,00	0,01
B_W_14	0,15	0,01	0,10
B_Z_01	0,07	0,00	0,05
B_Z_02	0,10	0,04	0,08
B_Z_03	0,07	0,02	0,06
B_Z_04	0,04	0,00	0,03
B_Z_05	0,07	0,03	0,06
B_Z_06	0,02	0,00	0,01
B_Z_07	0,03	0,00	0,02
B_Z_08	0,02	0,00	0,01
B_Z_09	0,03	0,00	0,02
B_Z_10	0,03	0,00	0,02
B_Z_11	0,03	0,00	0,01
B_Z_12	0,05	0,02	0,04
B_Z_13	0,04	0,01	0,02
B_Z_14	0,15	0,07	0,13
S_W_1	0,24	0,11	0,18
S_W_2	0,10	0,00	0,05
S_W_3	0,33	0,10	0,17
S_Z_1	5,40	0,99	1,59

Tablica 6.23. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
S_Z_2	2,08	0,26	0,56
S_Z_3	1,20	0,50	0,64

W przypadku średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wyniosła ona od 0,00°C do 0,17°C, wartości ekstremalne natomiast od 0,01°C do 0,20°C (maksimum), a dla wartości minimalnej od 0,00°C do 0,12°C (Tablica 6.24).

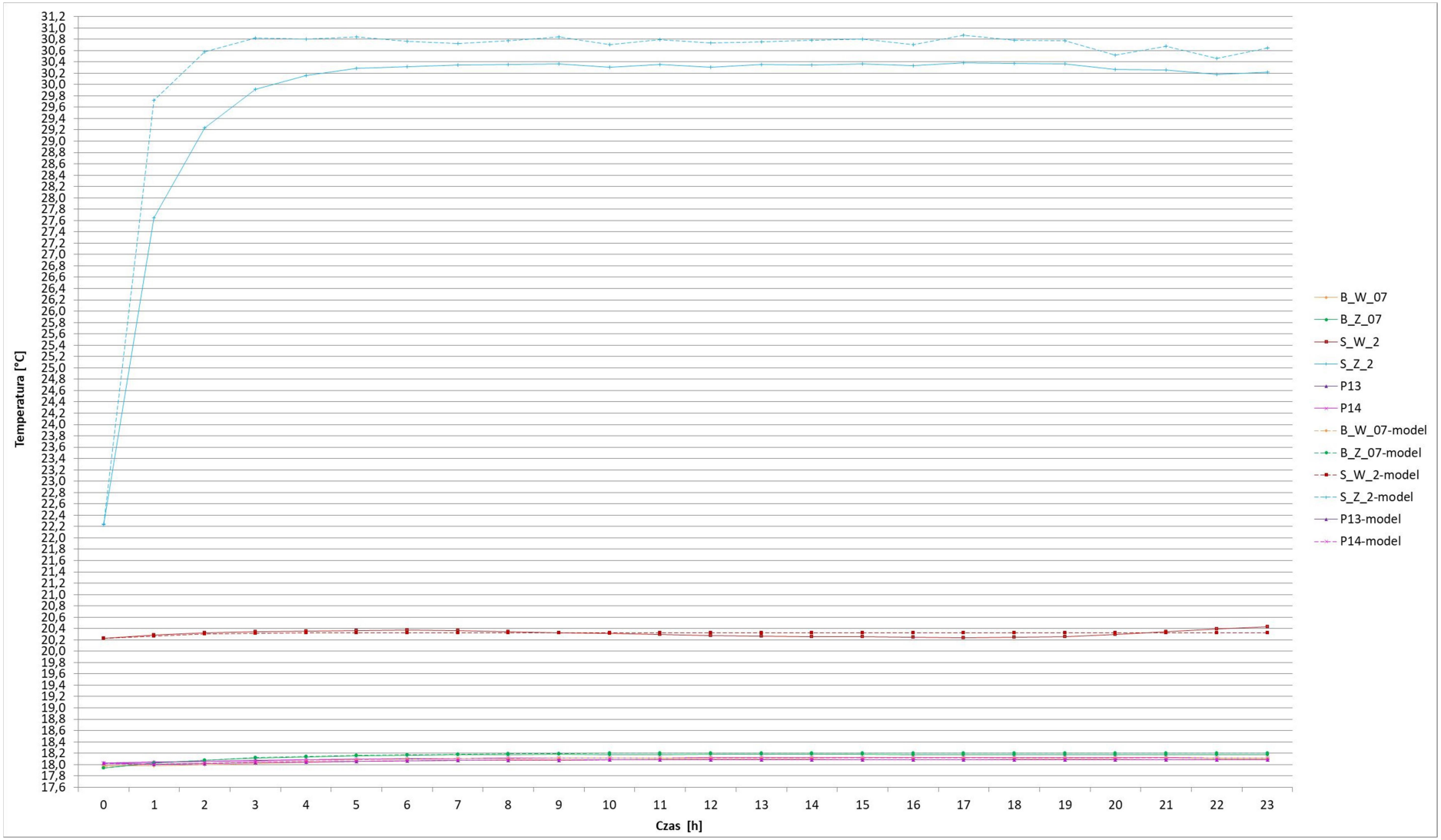
Tablica 6.24. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,03	0,00	0,01
P02	0,05	0,02	0,03
P03	0,03	0,00	0,01
P04	0,04	0,02	0,02
P05	0,02	0,01	0,01
P06	0,03	0,02	0,02
P07	0,07	0,05	0,05
P08	0,01	0,00	0,00
P09	0,03	0,01	0,02
P10	0,05	0,04	0,04
P11	0,05	0,04	0,04
P12	0,04	0,03	0,03
P13	0,04	0,03	0,04
P14	0,04	0,03	0,03
P15	0,05	0,03	0,04
P16	0,07	0,05	0,06
P17	0,05	0,05	0,05
P18	0,06	0,05	0,05
P19	0,04	0,03	0,04
P20	0,08	0,06	0,07
P21	0,09	0,07	0,08
P22	0,08	0,06	0,07
P23	0,07	0,05	0,07
P24	0,10	0,06	0,09

Tablica 6.24. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P25	0,17	0,12	0,15
P26	0,20	0,09	0,17

Na wykresie (Rys. 6.10) krzywe opisane S_W_2 oraz S_W_2-model, czyli sporządzone na podstawie danych pomiarowych i wyników z modelu zbliżyły się do siebie i maksymalna zanotowana wartość bezwzględna różnicy wyniosła dla nich 0,10°C (23 godzina symulacji). Jest to spowodowane prawie stałą temperaturą w strefie wewnętrznej, pod koniec badań wzrosła ona jedynie o 0,23°C. Dla analogicznie zamontowanego czujnika, ale od strony zewnętrznej S_Z_2 w pierwszej godzinie obliczeń wartość bezwzględna różnicy temperatury wyniosła 2,08°C, po czym w 20 godzinie osiągnęła wartość minimalną 0,26°C.



Rys. 6.10. Przebieg wskazań czujników temperatury umieszczonych w osi symetrii na powierzchni warstw przegrody: betonu, styropianu oraz na powierzchni przewodów wewnątrz ściany otrzymanych z pomiarów doświadczalnych i wyznaczonych z modelu numerycznego dla temperatury zasilania pętli równej 18°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury w przypadku zasilania pętli czynnikiem o temperaturze 20°C mieściła się zakresie 0,11°C – 7,60°C, minimalna natomiast w przedziale 0,00°C – 1,18°C (Tablica 6.25). Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury wyniosła od 0,03°C do 1,89°C. Czujniki z oznaczeniem B_W oraz B_Z, czyli zamontowane na powierzchni betonu osiągnęły wartości bezwzględne różnicy temperatury: 0,00°C – 0,15°C (minimum), 0,03°C – 0,18°C (średnia) i 0,11°C – 0,26°C (maksimum).

Tablica 6.25. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,26	0,15	0,18
B_W_02	0,14	0,07	0,08
B_W_03	0,12	0,04	0,06
B_W_04	0,13	0,04	0,06
B_W_05	0,12	0,03	0,05
B_W_06	0,13	0,04	0,06
B_W_07	0,14	0,04	0,07
B_W_08	0,14	0,05	0,07
B_W_09	0,12	0,02	0,05
B_W_10	0,16	0,05	0,08
B_W_11	0,17	0,06	0,09
B_W_12	0,11	0,01	0,03
B_W_13	0,14	0,02	0,05
B_W_14	0,25	0,00	0,08
B_Z_01	0,16	0,09	0,10
B_Z_02	0,15	0,10	0,11
B_Z_03	0,12	0,06	0,07
B_Z_04	0,14	0,06	0,08
B_Z_05	0,14	0,08	0,09
B_Z_06	0,12	0,03	0,04
B_Z_07	0,13	0,04	0,05
B_Z_08	0,12	0,02	0,04
B_Z_09	0,15	0,07	0,08
B_Z_10	0,11	0,03	0,04
B_Z_11	0,11	0,02	0,03
B_Z_12	0,13	0,05	0,07
B_Z_13	0,11	0,01	0,03
B_Z_14	0,22	0,00	0,06
S_W_1	0,46	0,02	0,22
S_W_2	0,44	0,00	0,13
S_W_3	0,66	0,08	0,37
S_Z_1	7,60	1,18	1,89
S_Z_2	3,32	0,36	0,68

Tablica 6.25. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
S_Z_3	1,02	0,47	0,59

Dla czujników zamocowanych na powierzchni przewodów maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury wyniosła od 0,03°C do 0,16°C, a minimalna od 0,00°C do 0,04°C (Tablica 6.26). Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury mieściła się w zakresie 0,00°C – 0,12°C.

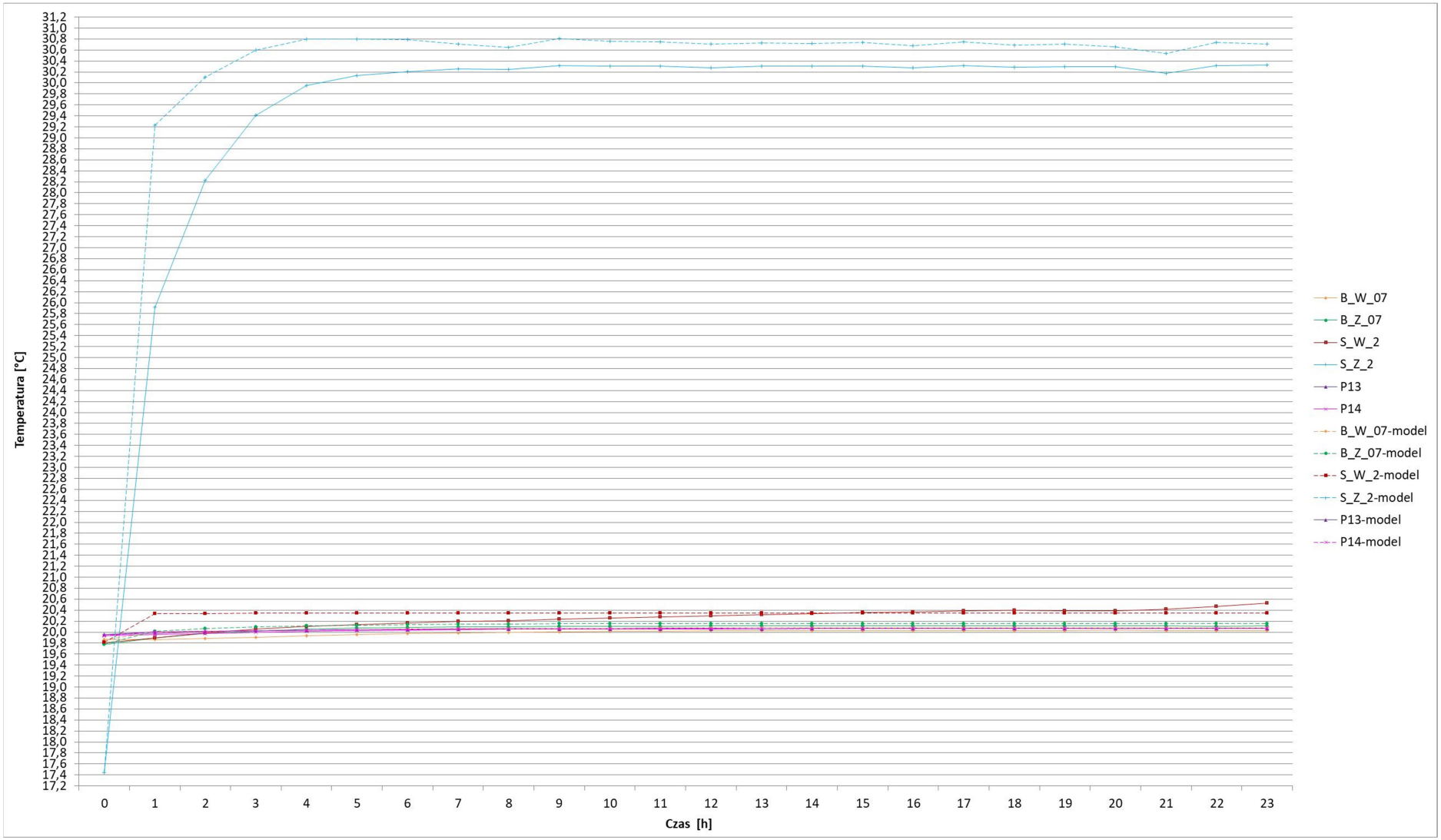
Tablica 6.26. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,09	0,04	0,05
P02	0,03	0,00	0,00
P03	0,04	0,01	0,02
P04	0,04	0,00	0,01
P05	0,03	0,00	0,01
P06	0,03	0,00	0,01
P07	0,04	0,01	0,03
P08	0,04	0,00	0,01
P09	0,04	0,00	0,01
P10	0,03	0,00	0,01
P11	0,03	0,00	0,01
P12	0,03	0,00	0,02
P13	0,03	0,00	0,01
P14	0,05	0,00	0,02
P15	0,04	0,00	0,02
P16	0,03	0,00	0,02
P17	0,04	0,00	0,03
P18	0,03	0,00	0,02
P19	0,04	0,00	0,03
P20	0,05	0,00	0,03
P21	0,05	0,00	0,03
P22	0,05	0,00	0,03
P23	0,06	0,00	0,04
P24	0,06	0,00	0,04
P25	0,16	0,02	0,12

Tablica 6.26. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P26	0,14	0,00	0,09

Największe rozbieżności między modelem a badaniami dla czujników zamontowanych w osi symetrii bądź najbliżej niej zaobserwowano w pierwszej godzinie obliczeń dla wszystkich czujników (Rys. 6.11).



Rys. 6.11. Przebieg wskazań czujników temperatury umieszczonych w osi symetrii na powierzchni warstw przegrody: betonu, styropianu oraz na powierzchni przewodów wewnątrz ściany otrzymanych z pomiarów doświadczalnych i wyznaczonych z modelu numerycznego dla temperatury zasilania pętli równej 20°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

W poniższej tablicy (Tablica 6.27) prezentującej wyniki dotyczące wartości bezwzględnej różnicy temperatury w przypadku zasilania pętli czynnikiem o temperaturze 22°C minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury zawierała się w zakresie 0,00°C – 1,23°C, średnia 0,04°C – 1,97°C, a maksymalna 0,11°C – 8,08°C. Największe wartości z wymienionych przedziałów odnosiły się do czujnika S_Z_1 zamontowanego na powierzchni styropianu najbliżej podłogi w strefie zewnętrznej. W przypadku czujników umieszczonych na powierzchni betonu wartości były niższe i osiągały poziom od 0,00°C do 0,17°C (minimum), od 0,04°C do 0,20°C (średnia) oraz od 0,11°C do 0,26°C (maksimum).

Tablica 6.27. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,26	0,17	0,20
B_W_02	0,13	0,07	0,09
B_W_03	0,11	0,04	0,06
B_W_04	0,13	0,06	0,08
B_W_05	0,12	0,04	0,06
B_W_06	0,14	0,06	0,08
B_W_07	0,13	0,04	0,07
B_W_08	0,12	0,03	0,05
B_W_09	0,13	0,04	0,07
B_W_10	0,14	0,05	0,07
B_W_11	0,18	0,09	0,11
B_W_12	0,11	0,02	0,04
B_W_13	0,14	0,02	0,05
B_W_14	0,25	0,00	0,07
B_Z_01	0,19	0,11	0,12
B_Z_02	0,16	0,09	0,10
B_Z_03	0,13	0,05	0,06
B_Z_04	0,16	0,06	0,07
B_Z_05	0,14	0,06	0,07
B_Z_06	0,16	0,04	0,05
B_Z_07	0,17	0,06	0,07
B_Z_08	0,17	0,05	0,07
B_Z_09	0,15	0,04	0,06
B_Z_10	0,14	0,03	0,05
B_Z_11	0,13	0,02	0,04
B_Z_12	0,17	0,07	0,08
B_Z_13	0,15	0,04	0,05
B_Z_14	0,23	0,00	0,06
S_W_1	0,54	0,19	0,28
S_W_2	0,16	0,00	0,10
S_W_3	0,32	0,00	0,23

Tablica 6.27. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

S_Z_1	8,08	1,23	1,97
S_Z_2	3,96	0,35	0,70
S_Z_3	0,97	0,48	0,57

Dla punktów pomiarowych zlokalizowanych na powierzchni przewodów wartości bezwzględne różnicy temperatury osiągnęły największe wartości w miejscu zamontowania czujnika P25 i były to wartości 0,17°C (maksimum), 0,14°C (średnia) oraz 0,05°C (minimum) (Tablica 6.28). Dla pozostałych czujników wartości były niższe, ale wyższe niż 0,02°C (maksimum), 0,01°C (średnia) oraz 0,00°C (minimum).

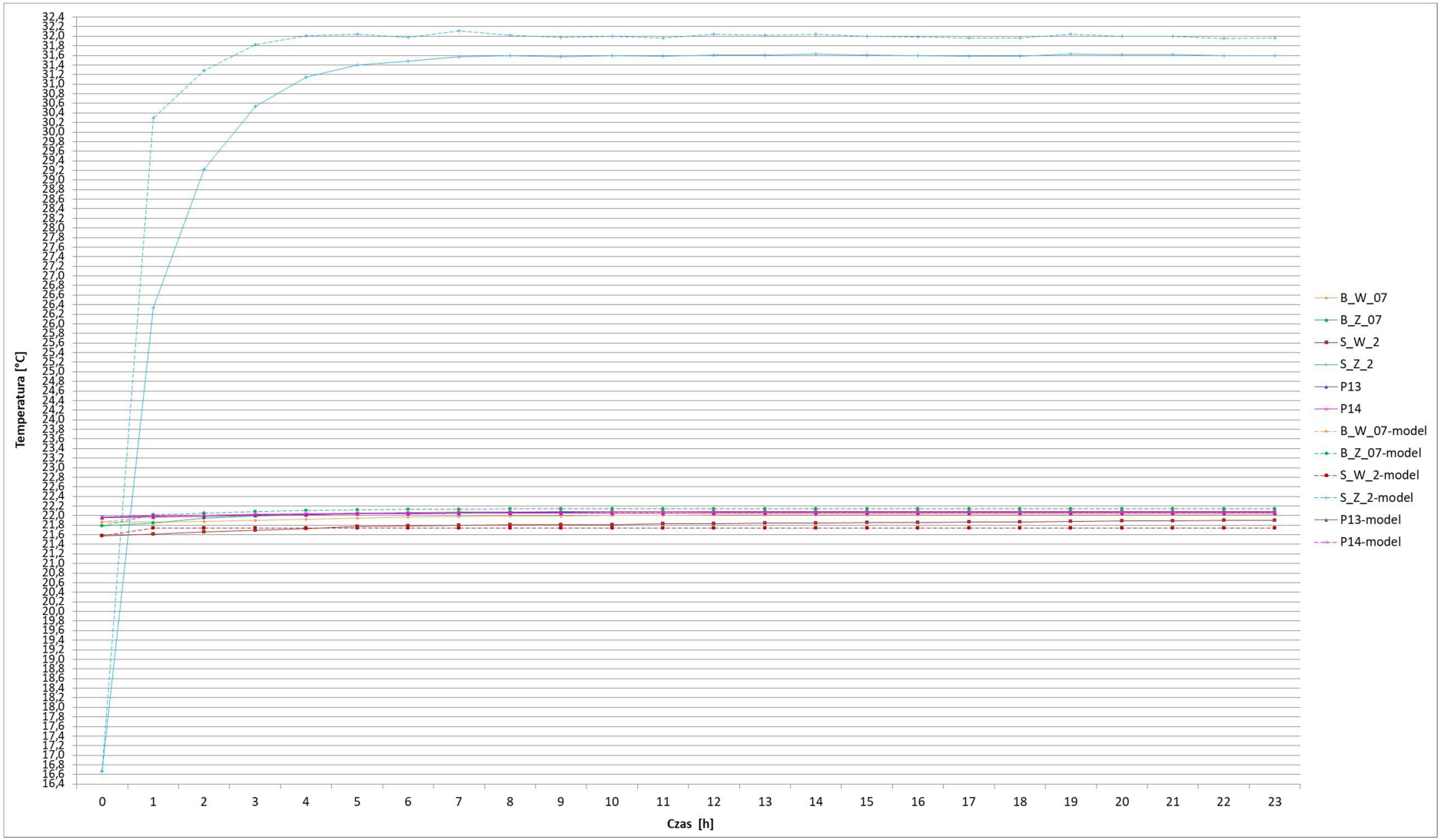
Tablica 6.28. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,09	0,03	0,05
P02	0,03	0,00	0,01
P03	0,04	0,00	0,01
P04	0,02	0,00	0,01
P05	0,02	0,00	0,01
P06	0,03	0,00	0,02
P07	0,03	0,00	0,02
P08	0,04	0,00	0,01
P09	0,03	0,00	0,01
P10	0,03	0,00	0,02
P11	0,03	0,00	0,02
P12	0,03	0,00	0,01
P13	0,04	0,00	0,01
P14	0,04	0,00	0,03
P15	0,04	0,00	0,02
P16	0,04	0,01	0,03
P17	0,03	0,00	0,02
P18	0,05	0,01	0,04
P19	0,04	0,00	0,03
P20	0,06	0,00	0,04
P21	0,05	0,01	0,03
P22	0,05	0,01	0,04
P23	0,05	0,00	0,04
P24	0,06	0,01	0,05

Tablica 6.28. c.d. Zestawienie maksymalnej, minimalnej oraz średniej wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Numer czujnika	Maksymalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Minimalna wartość bezwzględna różnicy temperatury	Średnia wartość bezwzględna różnicy temperatury
[-]	[°C]	[°C]	[°C]
P25	0,17	0,05	0,14
P26	0,11	0,01	0,08

Na podstawie wykresu (Rys. 6.12) prezentującego wyniki obliczeń i pomiarów dla czujników: na powierzchni betonu (B_W_07 i B_Z_07), na powierzchni styropianu (S_W_2 i S_Z_2) oraz na powierzchni pętli w ścianie (P13 i P14) zauważono, że największa wartość bezwzględna różnicy temperatury wystąpiła w pierwszej godzinie obliczeń dla czujnika S_Z_2 (3,96°C). W przypadku czujnika na powierzchni styropianu w drugiej strefie powietrznej maksymalna wartość wyniosła 0,16°C w 23 godzinie badań.



Rys. 6.12. Przebieg wskazań czujników temperatury umieszczonych w osi symetrii na powierzchni warstw przegrody: betonu, styropianu oraz na powierzchni przewodów wewnątrz ściany otrzymanych z pomiarów doświadczalnych i wyznaczonych z modelu numerycznego dla temperatury zasilania pętli równej 22°C dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Wartości RMSE wyniosły dla wariantów temperatury zasilania: 16°C od 0,01°C do 1,68°C, 18°C od 0,01°C do 1,83°C, 20°C od 0,04°C do 2,37 oraz 22°C od 0,04°C do 2,49°C (Tablica 6.29). Najwyższe wartości dotyczyły czujnika S_Z_1, natomiast najniższe: B_W_02, B_W_04, B_W_07, B_W_08, B_W_12 i B_Z_06 – łącznie 6 czujników dla 16°C, B_W_05, B_W_12, B_Z_06, B_Z_08 i B_Z_11 – razem 5 czujników dla 18°C, B_W_12, B_Z_08, B_Z_10, B_Z_11 i B_Z_13 – 5 czujników dla 20°C oraz B_Z_11 dla 22°C. Dla czujników na powierzchni betonu w zależności od typu strony – wewnętrznej i zewnętrznej oraz temperatury zasilania pętli wartości RMSE wyniosły: dla 16°C 0,01°C – 0,22°C (B_W) oraz 0,01°C – 0,24°C (B_Z), dla 18°C 0,01°C – 0,11°C (B_W) oraz 0,01°C – 0,13°C (B_Z), dla 20°C 0,04°C – 0,18°C (B_W) oraz 0,04°C – 0,10°C (B_Z), dla 22°C 0,05°C – 0,19°C (B_W) oraz 0,04°C – 0,12°C (B_Z). Powierzchnia styropianu w strefie wewnętrznej charakteryzowała się wartościami RMSE: od 0,36°C do 0,76°C dla 16°C, od 0,05°C do 0,18°C dla 18°C, od 0,17°C do 0,39°C dla 20°C oraz od 0,11°C do 0,28°C dla 22°C. Co do powierzchni styropianu w strefie zewnętrznej przedziały RMSE były następujące: 0,64°C – 1,68°C dla 16°C, 0,65°C – 1,83°C dla 18°C, 0,60°C – 2,37°C dla 20°C oraz 0,57°C – 2,49°C dla 22°C.

Tablica 6.29. Zestawienie wartości RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Temperatura zasilania / Numer czujnika	16	18	20	22
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
B_W_01	0,02	0,07	0,18	0,19
B_W_02	0,01	0,03	0,08	0,09
B_W_03	0,05	0,05	0,06	0,06
B_W_04	0,01	0,02	0,06	0,08
B_W_05	0,02	0,01	0,05	0,06
B_W_06	0,02	0,03	0,07	0,09
B_W_07	0,01	0,03	0,07	0,07
B_W_08	0,01	0,02	0,07	0,06
B_W_09	0,02	0,03	0,05	0,07
B_W_10	0,02	0,02	0,08	0,07
B_W_11	0,03	0,05	0,09	0,11
B_W_12	0,01	0,01	0,04	0,05
B_W_13	0,02	0,02	0,06	0,06
B_W_14	0,22	0,11	0,10	0,10
B_Z_01	0,04	0,05	0,10	0,12
B_Z_02	0,08	0,08	0,10	0,10
B_Z_03	0,08	0,06	0,07	0,06
B_Z_04	0,02	0,03	0,08	0,08
B_Z_05	0,04	0,06	0,08	0,07
B_Z_06	0,01	0,01	0,05	0,06
B_Z_07	0,02	0,02	0,05	0,08
B_Z_08	0,03	0,01	0,04	0,07
B_Z_09	0,02	0,02	0,08	0,06

Tablica 6.29. c.d. Zestawienie wartości RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni betonu oraz styropianu dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Temperatura zasilania / Numer czujnika	16	18	20	22
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
B_Z_10	0,02	0,02	0,04	0,05
B_Z_11	0,02	0,01	0,04	0,04
B_Z_12	0,03	0,04	0,07	0,08
B_Z_13	0,05	0,03	0,04	0,06
B_Z_14	0,24	0,13	0,08	0,08
S_W_1	0,51	0,18	0,24	0,28
S_W_2	0,36	0,05	0,17	0,11
S_W_3	0,76	0,17	0,39	0,24
S_Z_1	1,68	1,83	2,37	2,49
S_Z_2	0,66	0,67	0,92	1,04
S_Z_3	0,64	0,65	0,60	0,57

Dla czujników zamontowanych na powierzchni przewodów wartości maksymalne zanotowano dla czujników P26 (0,25°C dla 16°C i 0,17°C dla 18°C) oraz P25 (0,12°C dla 20°C i 0,15°C dla 22°C). W kwestii minimalnej wartości to dla czujnika P08 zanotowano wartości minimalne dla każdej temperatury zasilania: 0,02°C dla 16°C i 0,01°C dla pozostałych 3 temperatur zasilania.

Tablica 6.30. Zestawienie wartości RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Temperatura zasilania / Numer czujnika	16	18	20	22
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
P01	0,05	0,01	0,05	0,05
P02	0,05	0,03	0,01	0,01
P03	0,02	0,01	0,02	0,01
P04	0,04	0,02	0,02	0,01
P05	0,05	0,01	0,01	0,02
P06	0,06	0,02	0,01	0,02
P07	0,06	0,05	0,03	0,02
P08	0,02	0,01	0,01	0,01
P09	0,06	0,02	0,01	0,01
P10	0,06	0,04	0,01	0,02
P11	0,05	0,04	0,01	0,02
P12	0,05	0,03	0,02	0,01
P13	0,05	0,03	0,02	0,02
P14	0,07	0,03	0,02	0,03
P15	0,06	0,04	0,02	0,02
P16	0,06	0,06	0,02	0,03
P17	0,06	0,05	0,03	0,02

Tablica 6.30. c.d. Zestawienie wartości RMSE dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów wewnątrz betonowej przegrody dla etapu wymuszenia skokowego temperatury zewnętrznej

Temperatura zasilania / Numer czujnika	16	18	20	22
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
P18	0,08	0,05	0,02	0,04
P19	0,06	0,04	0,03	0,03
P20	0,10	0,07	0,04	0,05
P21	0,08	0,08	0,04	0,04
P22	0,09	0,07	0,03	0,04
P23	0,10	0,06	0,04	0,04
P24	0,11	0,09	0,04	0,05
P25	0,19	0,15	0,12	0,15
P26	0,25	0,17	0,10	0,09

6.4. Wnioski

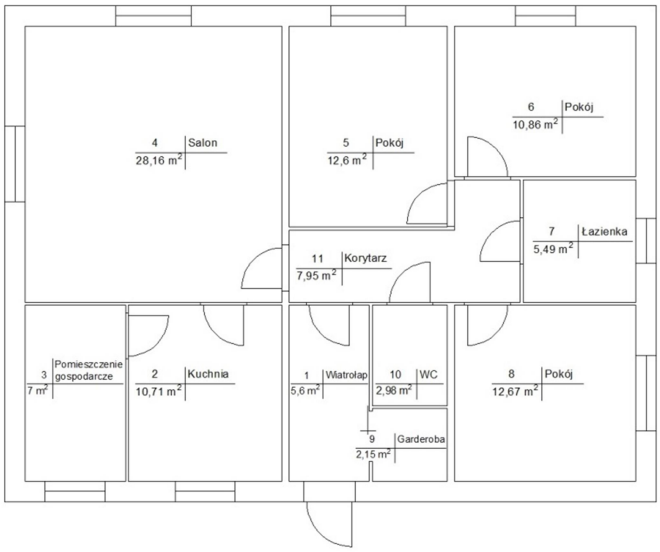
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że otrzymano dobrą zgodność wyników modelu numerycznego i wyników eksperymentów.

7. Symulacja stanów eksploatacyjnych systemu opartego na ścianie zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie w programie TRNSYS

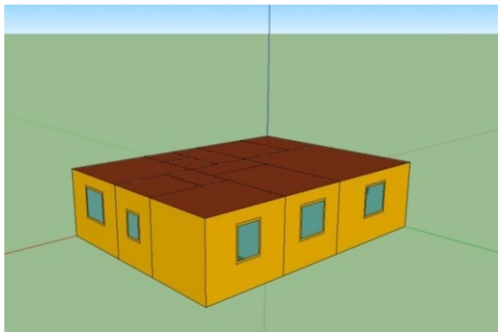
Do symulacji stanów eksploatacyjnych systemu opartego na ścianie z elementem aktywowanym termicznie posłużono się programem TRNSYS (a TRaNsient System Simulation program) [75]. W programie tym analizowany system opisywany jest za pomocą komponentów, które połączone ze sobą poprzez wejścia i wyjścia tworzą czarną skrzynkę (z ang. black box) [76]. Program TRNSYS składa się zatem z pakietu programów umożliwiających odzwierciedlenie obiektu. W tym celu wykonano model budynku za pomocą Trnsys3d – wtyczki do programu SketchUp. Następnie plik zaimportowano do TRNBuild – narzędzia służącego do scharakteryzowania budynku, a następnie wykorzystując TRNSYS Simulation Studio zilustrowano połączenia pomiędzy komponentami tworzącymi cały układ. Program TRNSYS funkcjonuje komercyjnie od 1975 roku i został opracowany w Uniwersytecie Wisconsin-Madison (Stany Zjednoczone Ameryki Północnej) [76].

7.1. Opis budynku wprowadzonego do programu SketchUp i TRNSYS

Analizie poddano budynek 1 kondygnacyjny składający się z 11 pomieszczeń o łącznej powierzchni 106 m^2 z dachem płaskim. Na poniższym rysunku (Rys. 7.1) przedstawiono rzut budynku, natomiast widok 3D na rysunku – Rys. 7.2.



Rys. 7.1. Rzut budynku (opracowanie własne)



Rys. 7.2. Widok 3D w programie SketchUp (opracowanie własne)

Ściana zewnętrzna tego budynku wykonana została z 15 cm warstwy betonu zaizolowanej z obu stron 13 cm warstwą styropianu. W osi symetrii wewnątrz betonu wprowadzono przewody tworzywowe PP o średnicy 20x2 mm z rozstawem 10 cm, które wypełniono wodą.

Współczynnik przenikania ciepła przegrody bez elementu aktywowanego termicznie wyniósł 0,12 W/(m^2·K).

Pozostałe przegrody, które nie posiadają elementu aktywowanego termicznie, również zostały tak skonstruowane, aby spełnić obowiązujące wymagania dotyczące współczynnika przenikania ciepła. Podłoga na gruncie równa 0,28 W/(m^2·K), stropodach o współczynniku 0,12 W/(m^2·K), natomiast ściany wewnętrzne (nośne i działowe) wynoszące 3,06 W/(m^2·K) oraz 3,49 W/(m^2·K).

W kwestii sposobu wentylacji zastosowano wentylację mechaniczną nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła na poziomie 85%. Strumienie objętości powietrza dostarczanego do pomieszczeń wyniosły dla: salonu 55 m^3/h, a dla pokoi po 25 m^3/h. W przypadku powietrza wywiewanego były to wartości: po 50 m^3/h dla kuchni i łazienki oraz 30 m^3/h dla WC.

Obciążenie cieplne pomieszczenie wyznaczono za pomocą programu InstalSystem 5 i wyniki zestawiono w poniższej tabeli (Tablica 7.1).

Tablica 7.1. Zestawienie pomieszczeń

Numer pomieszczenia	Przeznaczenie pomieszczenia	Powierzchnia użytkowa pomieszczenia	Obciążenie cieplne pomieszczenia
-	-	m^2	W
1	Wiatrołap	5,60	198
2	Kuchnia	10,71	273
3	Pomieszczenie gospodarcze	7,00	279
4	Salon	28,16	892
5	Pokój	12,60	355
6	Pokój	10,86	314
7	Łazienka	5,49	515
8	Pokój	12,67	363
9	Garderoba	2,15	60
10	WC	2,98	34
11	Korytarz	7,95	14

7.2. Przegroda aktywowana termicznie a zużycie energii

W celu określenia zużycia energii uwzględniono zyski wewnętrzne: od ludzi (120 W/osoba), urządzeń elektrycznych (komputer z kolorowym monitorem 230 W) i oświetlenia (dla żarówki 5 W/m) (Tablica 7.2) dla pomieszczeń mieszkalnych – pokoi, w przypadku salonu zdefiniowano zyski od osób, natomiast dla kuchni od oświetlenia. Dla reszty pomieszczeń ze względu na krótkotrwałe przebywanie osób nie wprowadzono zysków wewnętrznych. Dodatkowo wprowadzono harmonogram użytkowania dla osób, urządzeń oraz oświetlenia. Przyjęto dla dni roboczych (od poniedziałku do piątku) w godzinach 00:00-7:00 i 17:00-24:00 przebywanie osób, w godzinach 19:00-23:00 wykorzystywanie urządzeń oraz w godzinach 6:00-7:00 i 17:00-24:00 wykorzystywanie oświetlenia. W przypadku dni: sobota i niedziela przebywanie osób w godzinach 00:00-10:00

i 15:00-24:00, w godzinach 19:00-23:00 wykorzystywanie urządzeń oraz używanie oświetlenia w godzinach 16:00-24:00. W pozostałych godzinach nie uwzględniono zysków ciepła.

Tablica 7.2. Zestawienie pomieszczeń wraz z wewnętrznymi zyskami ciepła

Numer pomieszczenia	Przeznaczenie pomieszczenia	Zyski ciepła od ludzi		Zyski ciepła od urządzeń elektrycznych	Zyski ciepła od oświetlenia	Całkowite zyski ciepła
		Liczba osób	Zyski ciepła			
[-]	[-]	[-]	[W]	[W]	[W]	[W]
2	Kuchnia				59,10	59,10
4	Salon	2	240		309,70	549,70
5	Pokój	1	120	230	69,90	419,90
6	Pokój	1	120	230	63,10	413,10
8	Pokój	1	120	230	72,85	422,85

Dla sezonu grzewczego przyjęto w całym budynku temperaturę wewnętrzną równą 20°C, natomiast w okresie letnim, tj. od czerwca do sierpnia na poziomie 24°C.

Analizie poddano warianty zróżnicowane pod względem temperatury zasilania: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C elementu aktywowanego termicznie w ścianie zewnętrznej wykonanej z 15 cm grubości warstwy betonu i docieplonej z obu stron 13 cm warstwą styropianu o współczynniku przewodzenia ciepła równym 0,031 W/(m·K). W następnym kroku dla każdej wartości temperatury zasilania rozważono 5 opcji grubości betonu, czyli 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm oraz 30 cm. Dla 15 cm grubości betonu przenalizowano zastosowanie styropianu o grubości: 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm oraz 15 cm o współczynniku przewodzenia ciepła równym 0,031 W/(m·K). Współczynnik przewodzenia ciepła styropianu również był zmienny dla przegrody wejściowej (13cm styropianu/15 cm betonu/13 cm styropianu) osiągając wartości: 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K). Każdy z wariantów został również przestudiowany pod kątem braku elementu aktywowanego termicznie. Zapotrzebowanie na moc zaprezentowano dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w formie przebiegów godzinowych i dobowych oraz średnich wartości dla sezonu letniego, zimowego oraz całego roku.

Symulacje wykonano z 1 godzinowym krokiem czasowym.

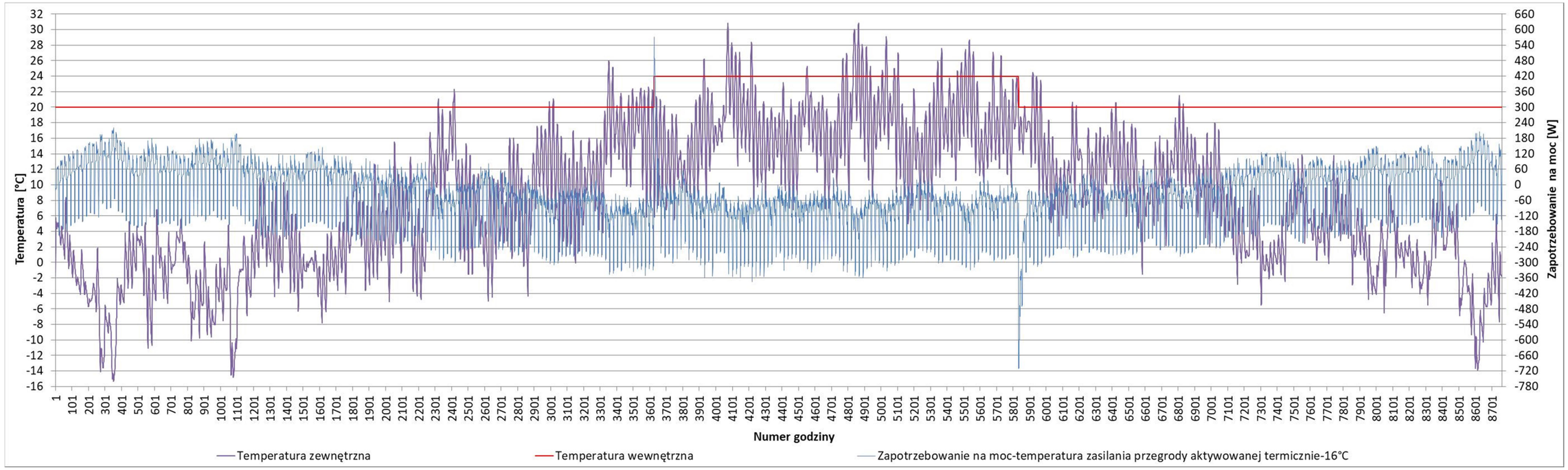
7.2.1. Zużycie energii a temperatura zasilania elementu aktywowanego termicznie w ścianie zewnętrznej

Zapotrzebowanie na moc przez okres roku przedstawiono na wykresach (Rys. 7.3 – Rys. 7.6) dla pomieszczenia nr 5 – pokoju, natomiast dobowe zapotrzebowanie na moc na rysunkach: Rys. 7.8 – Rys. 7.11 w zależności od temperatury zasilania elementu aktywowanego termicznie w ścianie zewnętrznej. Dla wariantu przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie godzinowe oraz dobowe zapotrzebowanie na moc przedstawiono na wykresach: Rys. 7.7 oraz Rys. 7.12. Ocenie

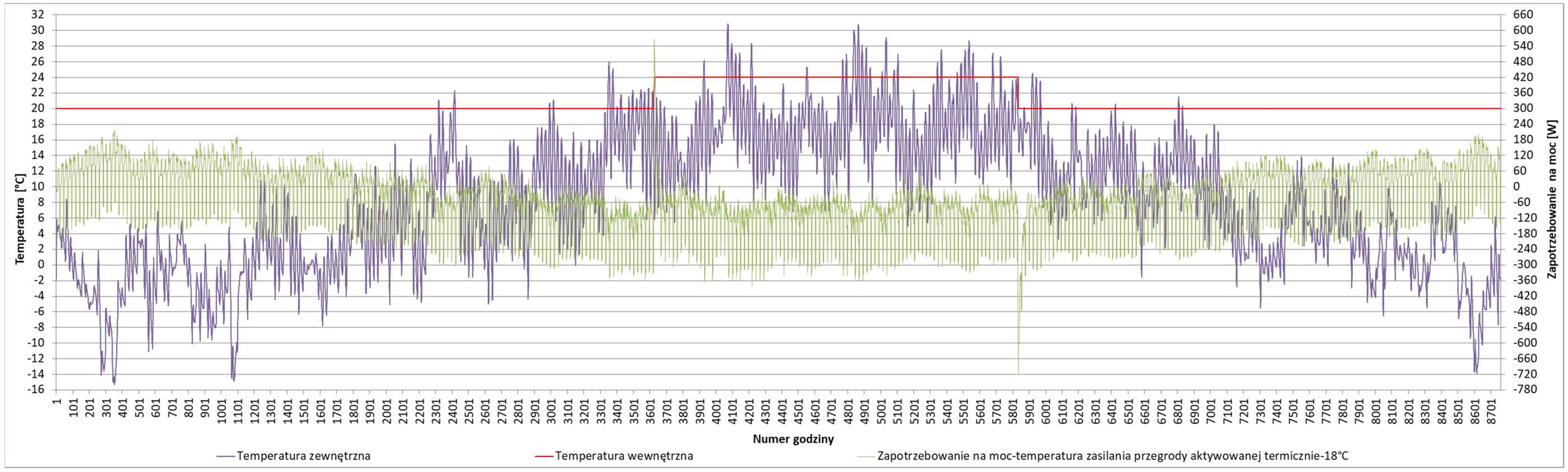
poddano ścianę zewnętrzną o łącznej grubości 41 cm [15 cm betonu i 13 cm styropianu po obu stronach o współczynniku przewodzenia ciepła równym 0,031 W/(m·K)].

Największe godzinowe wartości (Rys. 7.3 – Rys. 7.6) zanotowano na początku i na końcu sezonu letniego bez względu na temperaturę zasilania elementu aktywowanego termicznie. Dla temperatury 16°C były to wartości 571 W oraz -711 W, dla 18°C 566 W oraz -716 W, dla 20°C 562 W oraz -721 W, natomiast dla 22°C 557 W oraz -726 W. Wartości te są skrajne i spowodowane nagłą zmianą temperatury wewnętrznej: podgrzaniem o 4°C na początku sezonu letniego, oraz schłodzeniem o 4°C na końcu miesiąca sierpnia. Pomijając zatem te wartości skrajne zapotrzebowanie na moc na cele grzewcze dla temperatury zasilania ściany zewnętrznej nie przekracza 221 W dla 16°C, 216 W dla 18°C, 212 W dla 20°C oraz 208 W dla 22°C w 353 godzinie, kiedy to zanotowano najniższą temperaturę zewnętrzną równą -15,35°C. W sytuacji zapotrzebowania na moc na cele chłodnicze zaobserwowano wartości: -375 W dla 16°C, -379 W dla 18°C, -384 W dla 20°C oraz -388 W dla 22°C w 4220 godzinie (temperatura zewnętrzna 24,65°C). Dla przegrody klasycznej, czyli bez elementu aktywowanego termicznie (Rys. 7.7) zanotowano wartości 579 W oraz -733 W jako wielkości skrajne, a pomijając je zapotrzebowanie na moc na cele grzewcze wyniosło 235 W, a na cele chłodnicze -388 W. W kwestii zmian w danym okresie trybu grzania na tryb chłodzenia i na odwrót, zostało to spowodowane przyjęciem harmonogramu występowania całkowitych zysków ciepła, które dla pomieszczenia nr 5 mogą osiągnąć maksymalną wartość równą 419,90 W, czyli pokryć w całości obciążenie cieplne pomieszczenia równe 355 W.

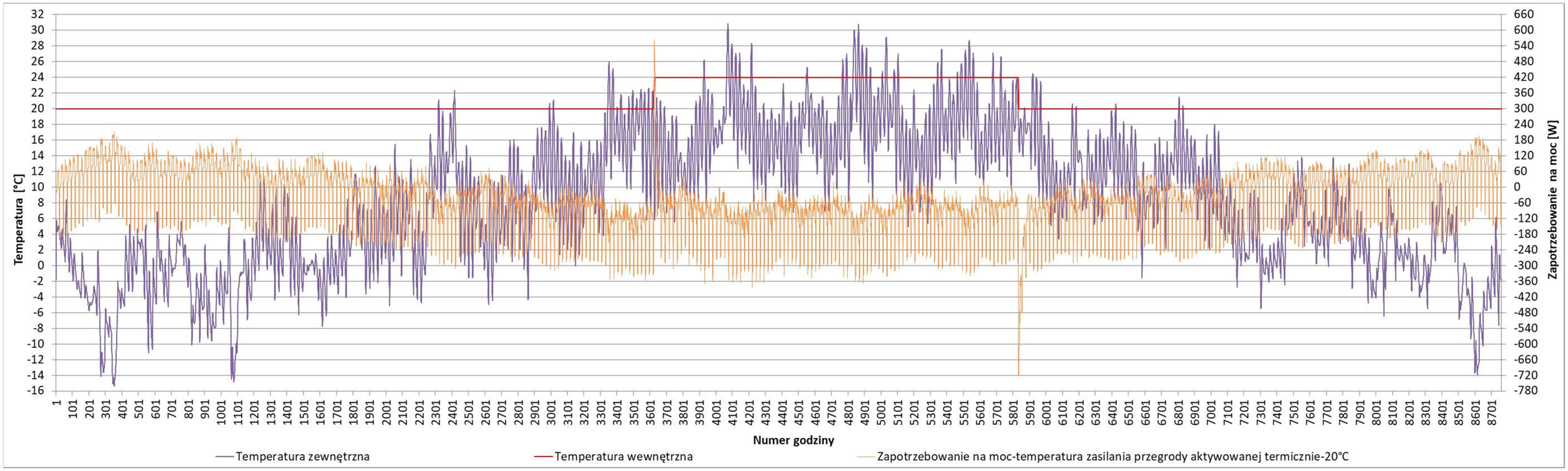
Przebieg dobowy zapotrzebowania na moc (Rys. 7.8 – Rys. 7.11) ponownie w dniach, w których nastąpiła zmiana założonej temperatury wewnętrznej, osiągnął wartości ekstremalne: 256 W i -459 W dla 16°C, 251 W i -463 W dla 18°C, 247 W i -468 W dla 20°C oraz 242 W i -473 W dla 22°C. W przypadku pominięcia powyższych wartości dobowe zapotrzebowanie na moc mieści się w przedziale: -172 W – 132 W dla 16°C, -177 W – 127 W dla 18°C, -181 W – 123 W dla 20°C oraz -186 W – 118 W dla 22°C. W kwestii ściany zewnętrznej bez elementu aktywowanego termicznie (Rys. 7.12) zakres ten wynosi: -184 W – 145 W nie biorąc po uwagę wartości skrajnych: 254 W i -473 W.



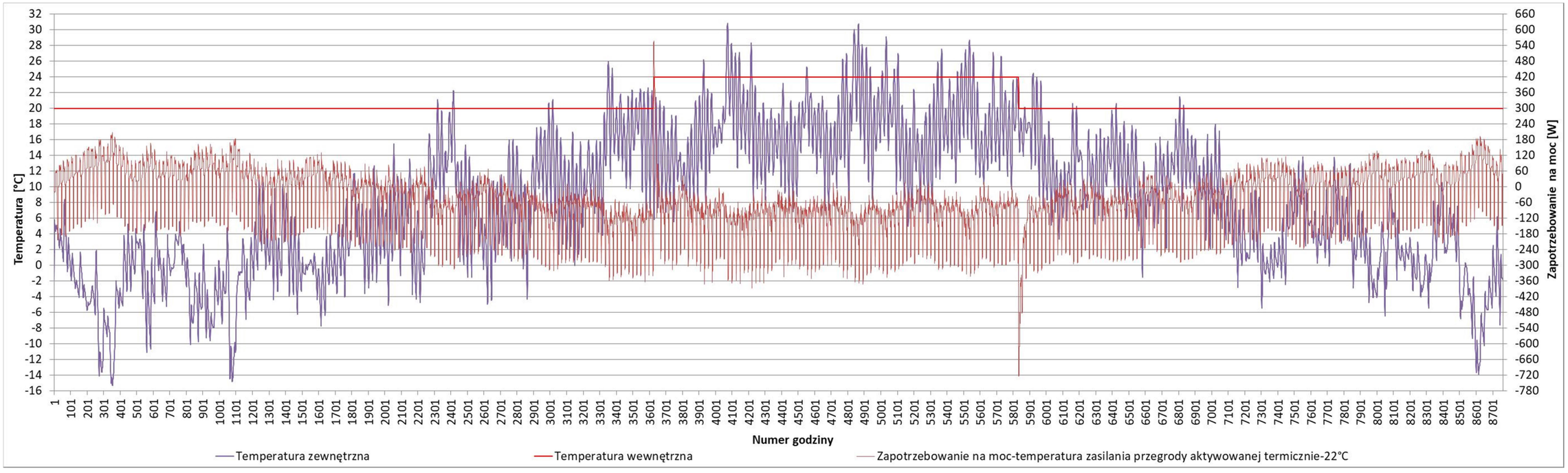
Rys. 7.3. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C



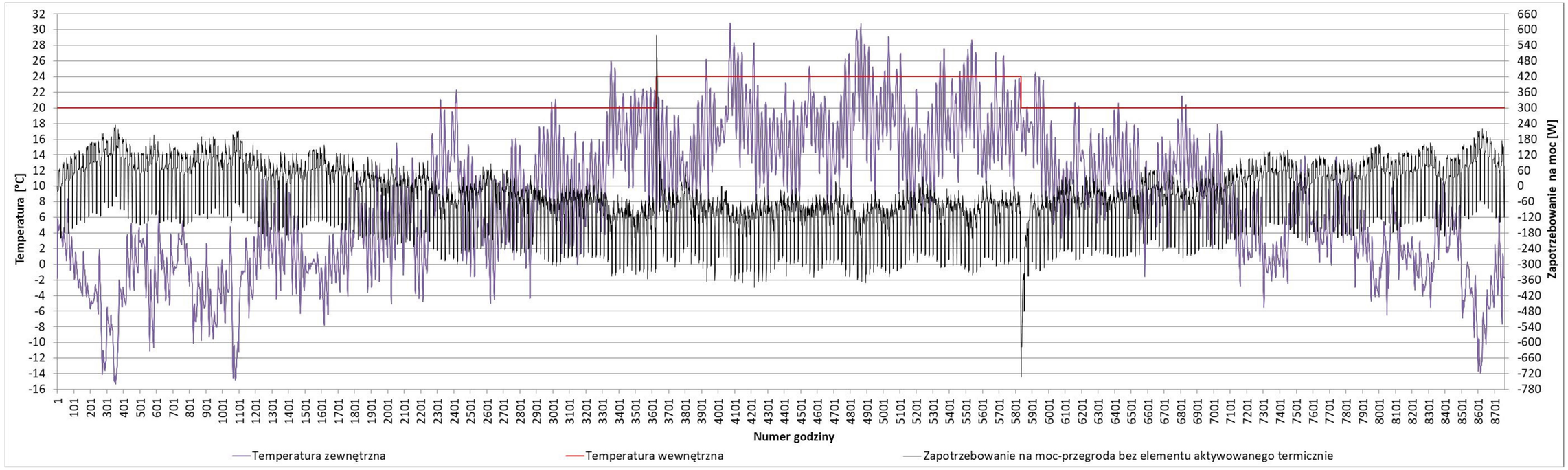
Rys. 7.4. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C



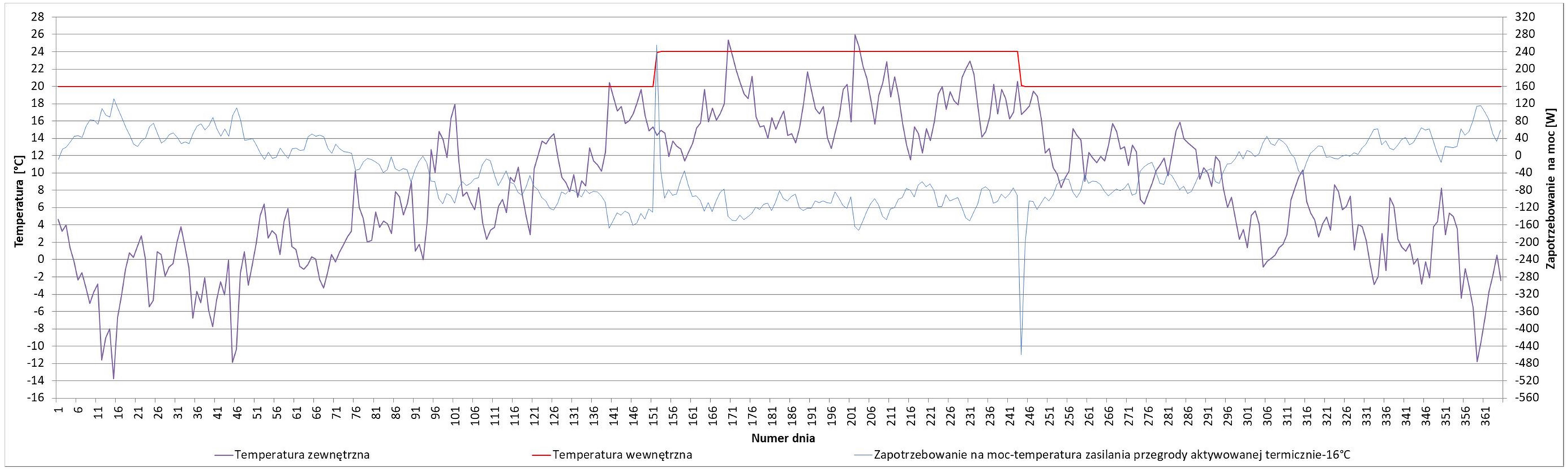
Rys. 7.5. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C



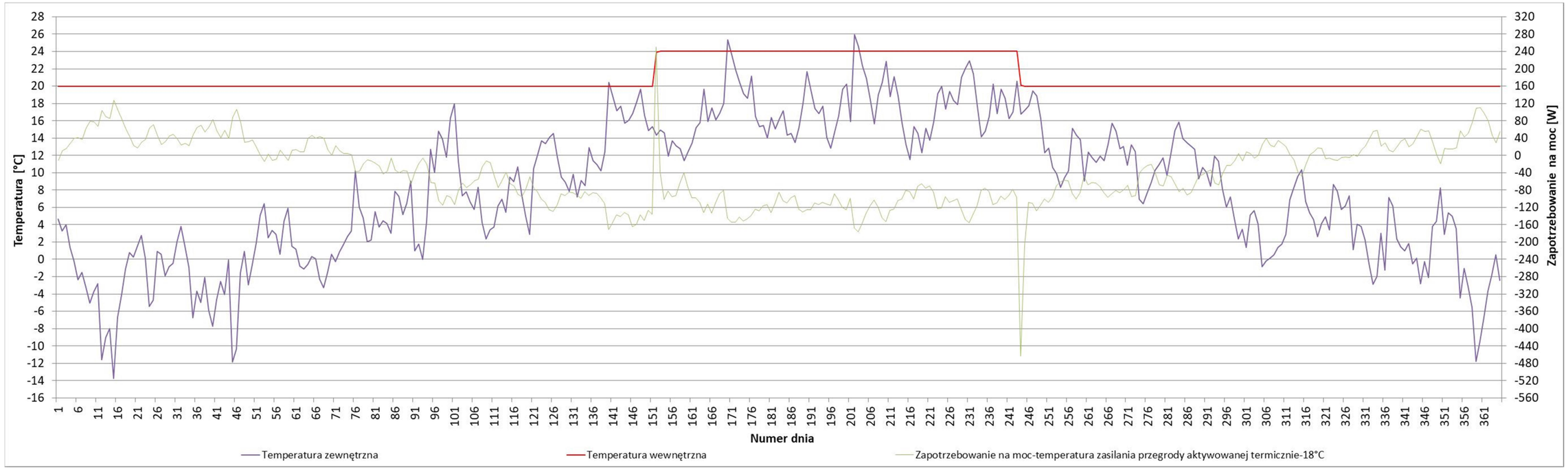
Rys. 7.6. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C



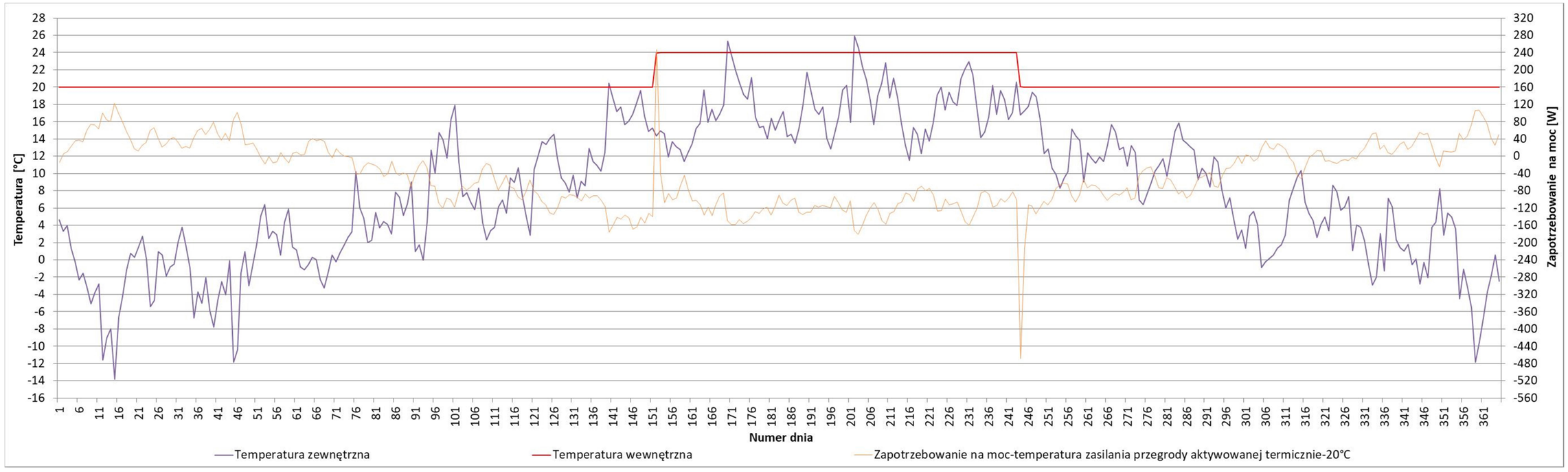
Rys. 7.7. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie



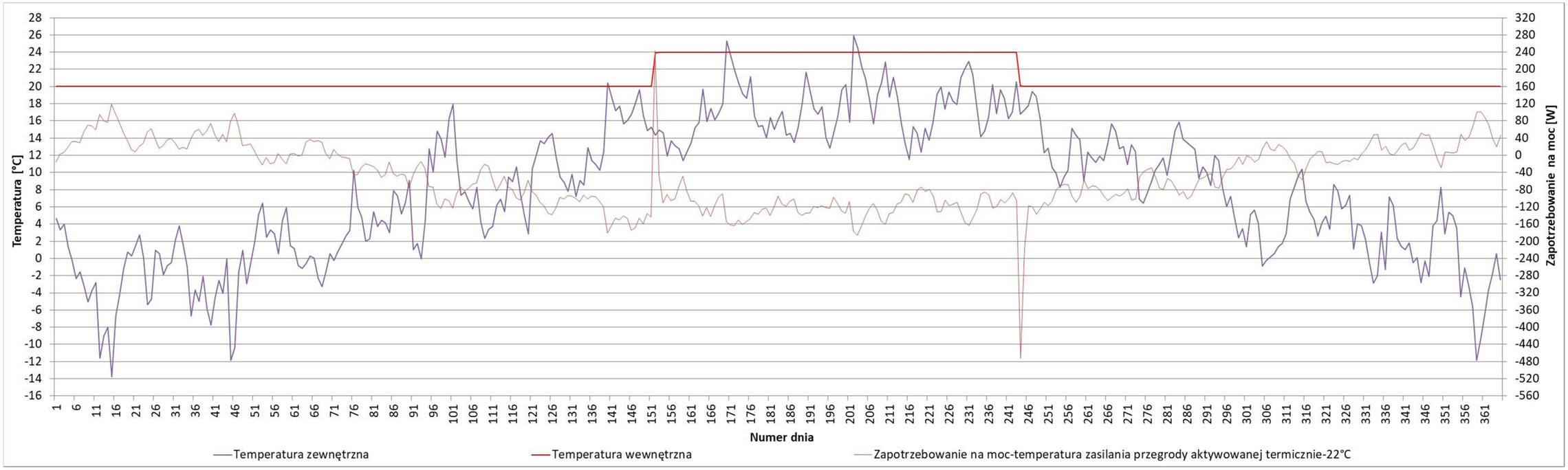
Rys. 7.8. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C



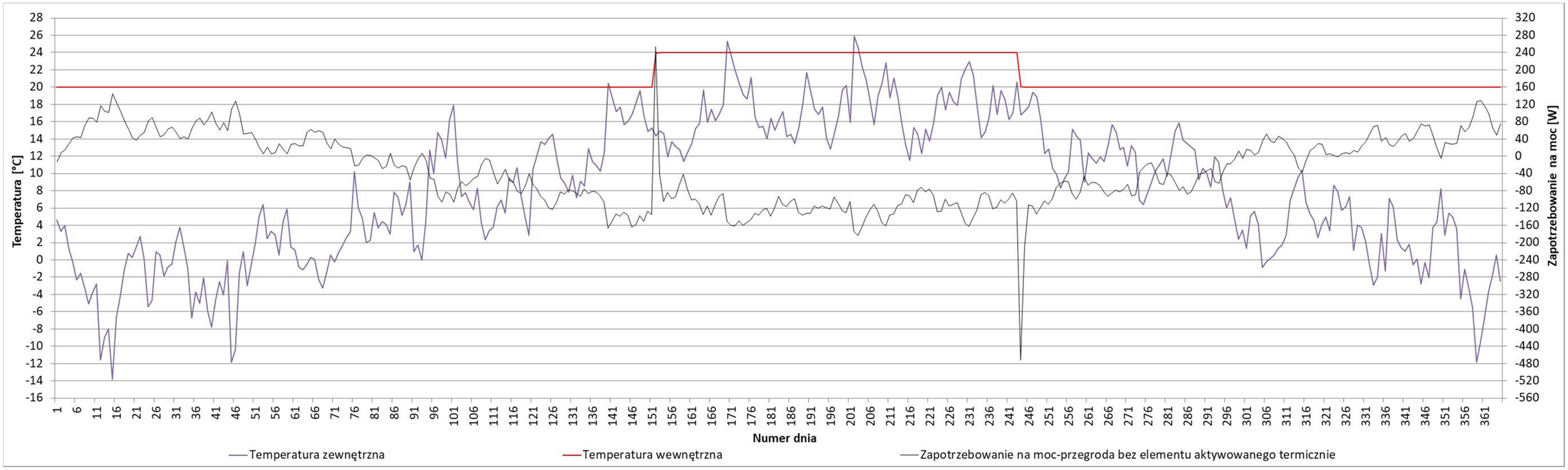
Rys. 7.9. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C



Rys. 7.10. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C

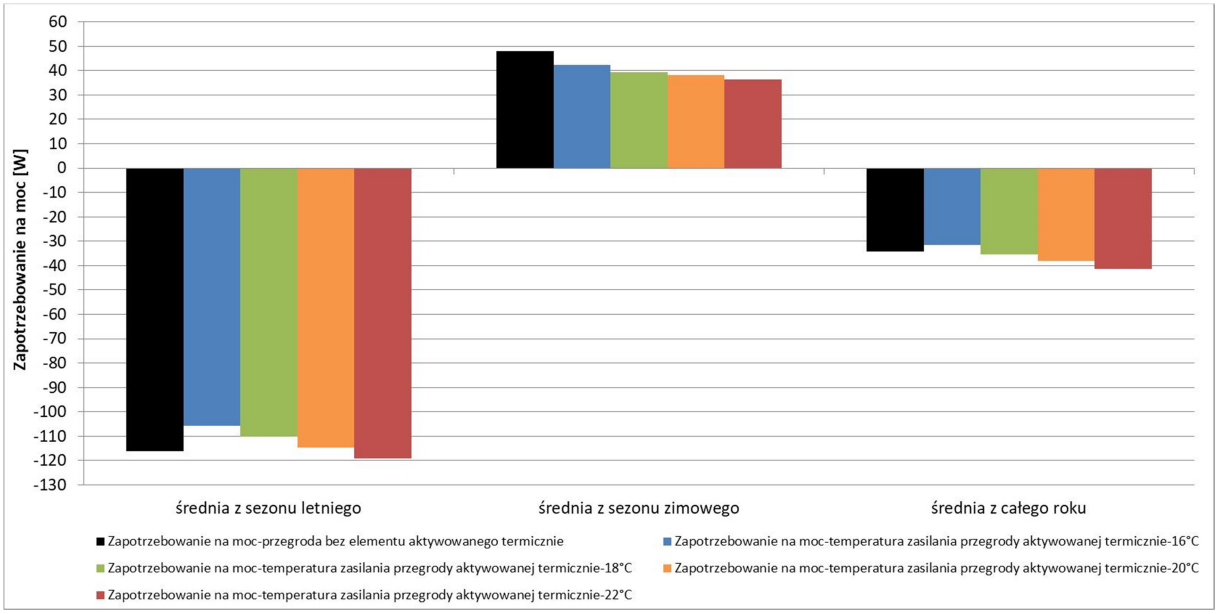


Rys. 7.11. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C



Rys. 7.12. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie

Na poniższym wykresie (Rys. 7.13) przedstawiono średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego oraz całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz w zależności od temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie równej 16°C, 18°C, 20°C i 22°C. Najniższe średnie zapotrzebowanie w sezonie letnim oraz w okresie całego roku zanotowano dla temperatury zasilania równej 16°C i były to wartości -106 W oraz -32 W, natomiast w sezonie zimowym wielkość ta była najwyższa i równa 42 W, oprócz sytuacji z przegrodą klasyczną dla której zanotowano wartość 48 W. W tym okresie wartość minimalną na poziomie 36 W osiągnięto dla czynnika o temperaturze 22°C, wówczas średnia z całego roku i z sezonu letniego wyniosła wartość maksymalną równą -119 W oraz -41 W. Pozostałe wartości dotyczące ściany zewnętrznej bez elementu aktywowanego termicznie wyniosły -116 W (średnia z sezonu letniego) i -34 W (średnia z całego roku).



Rys. 7.13. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz w zależności od temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C, 18°C, 20°C i 22°C

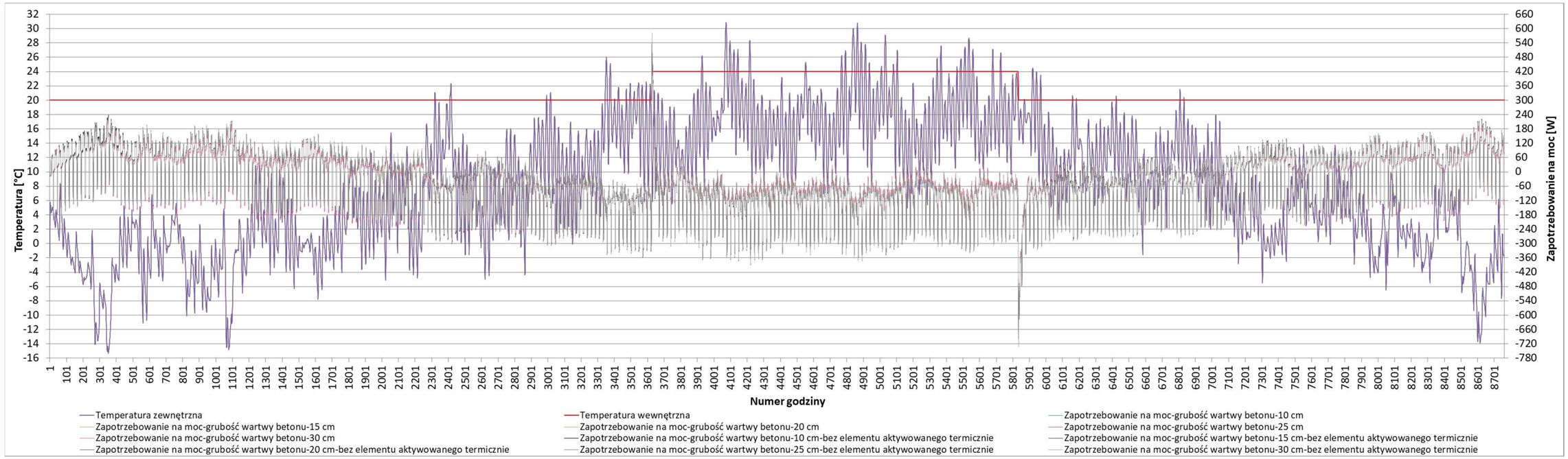
7.2.2. Zużycie energii a grubość betonu

Dla wartości temperatury zasilania równej: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C przegrody aktywowanej termicznie oraz bez elementu aktywowanego termicznie dla pomieszczenia nr 5 – pokoju wyznaczono przebiegi godzinowe oraz dobowe zapotrzebowania na moc i ich średnie wartości dla sezonu letniego, zimowego oraz całego roku w zależności od grubości betonu (Rys. 7.14 – Rys. 7.25). Przeanalizowano warianty ściany zewnętrznej z grubością betonu równą: 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm oraz 30 cm i zaizolowanej z obu stron styropianem o grubości 13 cm i współczynniku przewodzenia ciepła równym 0,031 W/(m·K).

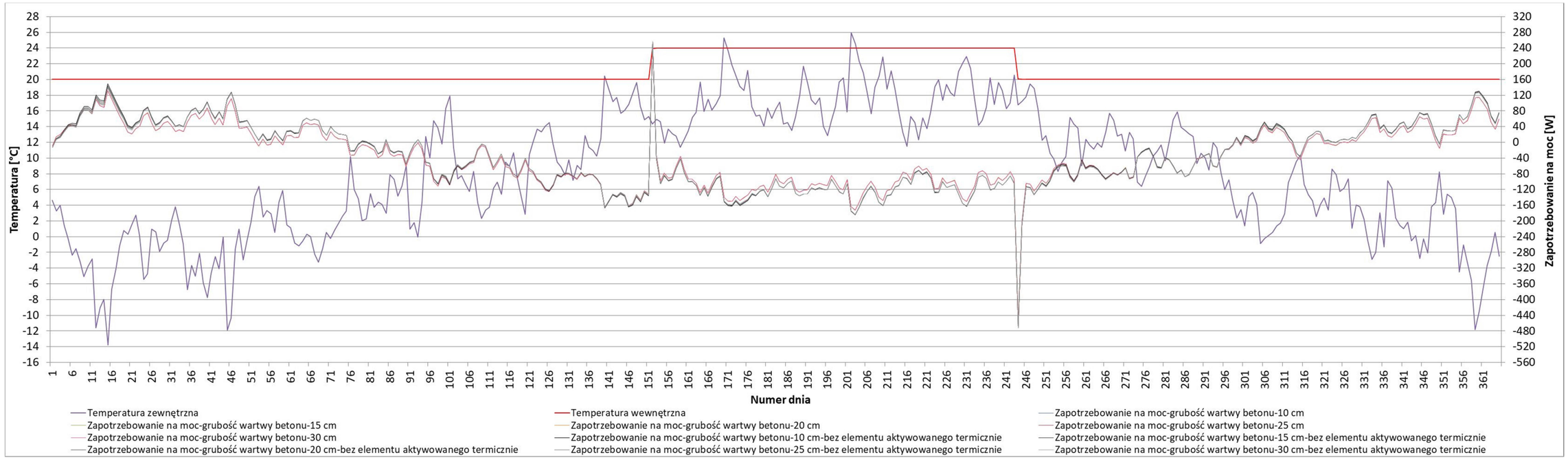
- Temperatura zasilania równa 16°C

Krzywe zapotrzebowania na moc w zależności od grubości betonu przedstawiono na wykresach (Rys. 7.14 i Rys. 7.15) wraz z przebiegiem temperatury zewnętrznej i wewnętrznej. Maksymalną wartość 571 W zanotowano w momencie wzrostu temperatury wewnętrznej z 20°C na 24°C (godzina 3627), a minimalną -711 W w 5834 godzinie, podczas spadku temperatury wewnętrznej z 24°C na 20°C bez względu na grubość betonu. Podobną sytuację w przypadku minimum zarejestrowano dla wariantów ściany zewnętrznej bez elementu aktywowanego termicznie wynoszącą -733 W bez względu na grubość betonu. W kwestii wartości maksymalnej była ona równa od 578 W (dla 10 cm grubości betonu) do 581 W (dla 30 cm grubości betonu). Przebiegi w okresie całego roku osiągnęły zbliżone wartości dla danych grubości betonu i temperatury zasilania, pomijając wartości ekstremalne, mieściły się zakresie -375 W – 221 W. W razie zastosowania przegrody bez przewodów przedział ten wyniósł -388 W – 235 W (taki sam zakres jak w rozdziale 7.2.1). W przypadku wartości dobowych osiągnięto poziom 256 W w 152 dniu, natomiast -459 W dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie oraz -473 dla ściany zewnętrznej bez modyfikacji w 244 dniu. W pozostałych dniach zapotrzebowanie na moc wyniosło od -172 W do 132 W (przegroda z przewodami) oraz od -184 W do 145 W (przegroda bez przewodów).

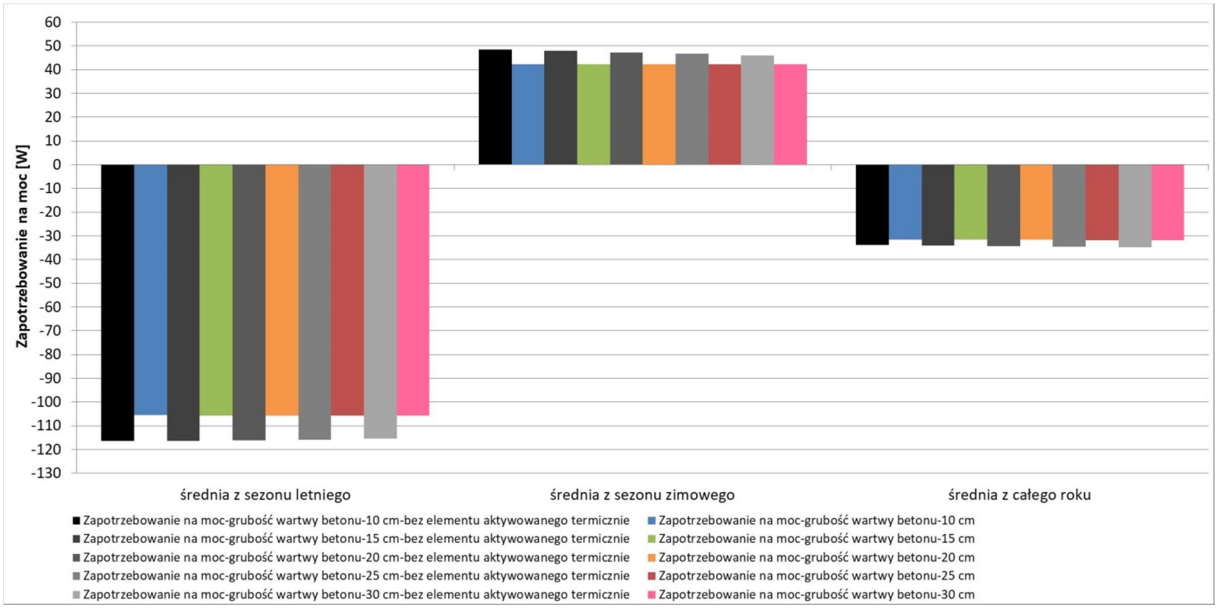
Średnie zapotrzebowanie na moc w sezonach oraz z całego roku są zbliżone w każdym z 5 wariantów grubości betonu dla ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie, latem wyniosła -106 W, zimą 42 W, a w okresie całego roku -32 W (Rys. 7.16). W przypadku przegrody bez przewodów różnice pomiędzy poszczególnymi grubościami betonu są niewielkie, latem od -116 W (beton – 10 cm) do -115 W (beton – 30 cm), zimą od 46 W (beton – 30 cm) do 49 W (beton – 10 cm), natomiast w okresie całego roku od -34 W (beton – 10 cm) do -35 W (beton – 30 cm)



Rys. 7.14. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm



Rys. 7.15. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm

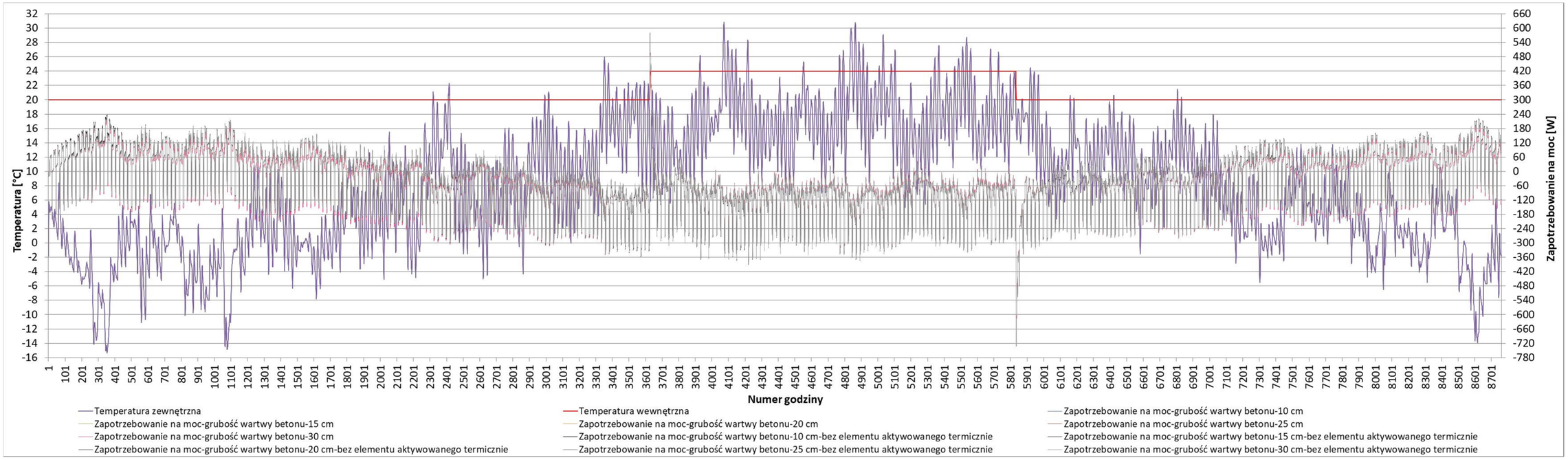


Rys. 7.16. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm

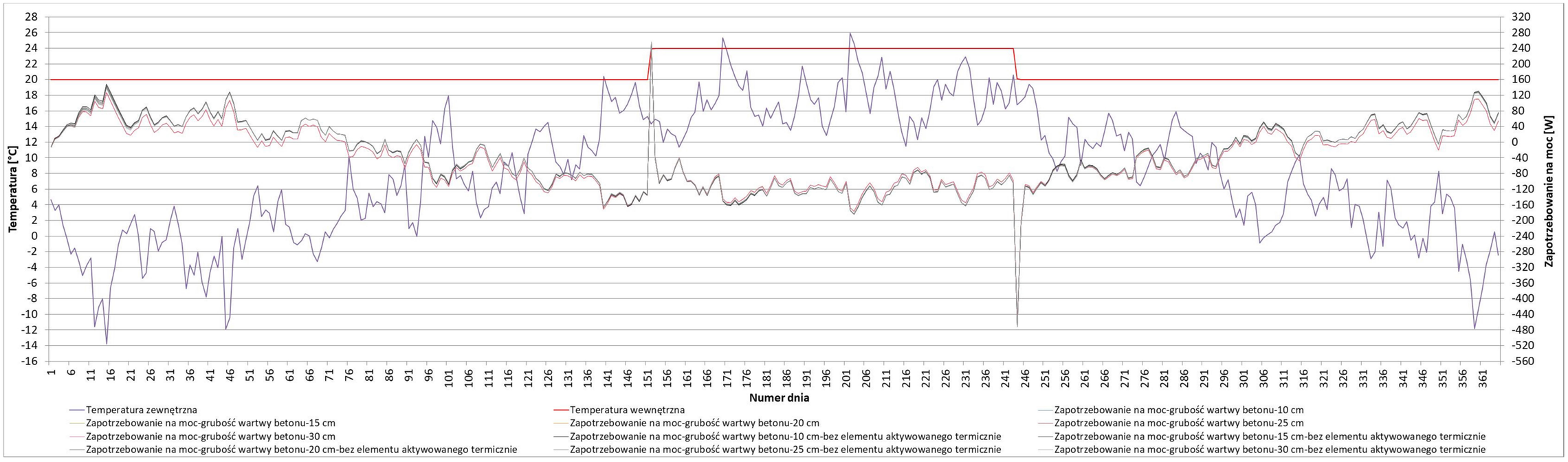
- Temperatura zasilania równa 18°C

Przebiegi godzinowe oraz dobowe zapotrzebowania na moc dla danych wartości temperatury zasilania przedstawione na poniższych wykresach (Rys. 7.17 i Rys. 7.18) pokrywają się ze sobą. Wspomniana wcześniej maksymalna wartość godzinowa wyniosła 566 W, minimalna -716 W, a pomijając te wartości skrajne wartość godzinowa zawierała się w przedziale -379 W – 216 W. Wartości te są niższe niż wartości dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie, czyli 581 W (maksimum) i -733 W (minimum), natomiast zakres -388 W – 235 W. Dla wartości dobowych opisanych w rozdziale 7.2.1 był to zakres -177 W – 127 W (nie uwzględniając wartości ekstremalnych 251 W oraz -463 W). Ponownie wartości te są niższe niż w przypadku wariantu przegrody bez przewodów, czyli zakres -184 W – 145 W (nie uwzględniając wartości ekstremalnych 256 W oraz -473 W).

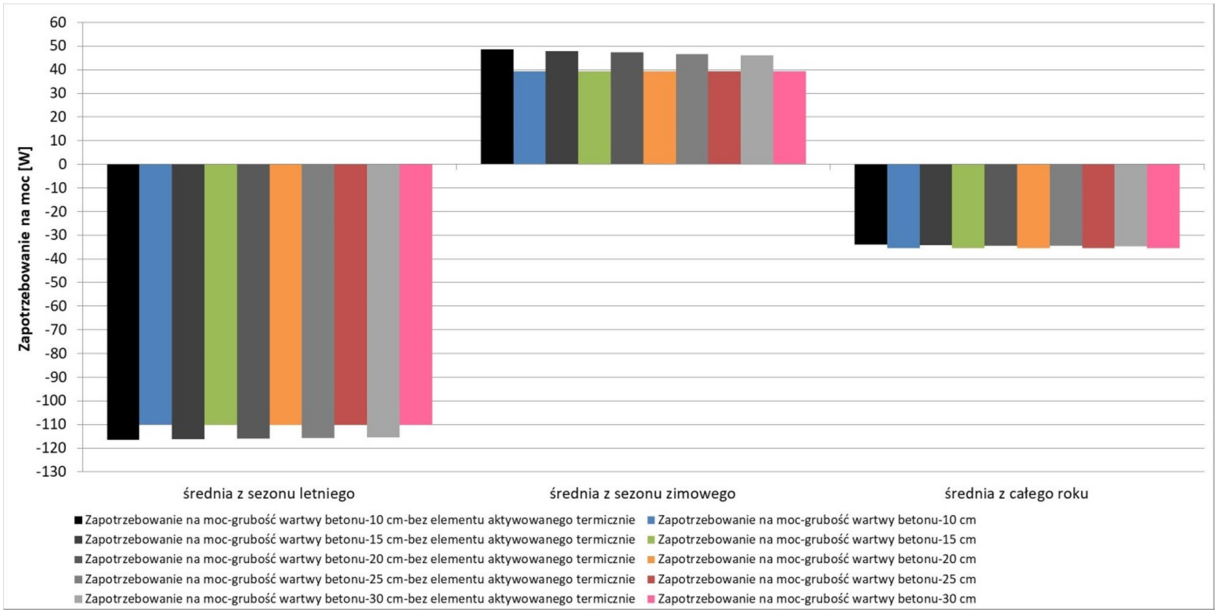
Podobną sytuację odnośnie porównywalnych wielkości bez względu na grubość betonu i temperaturę zasilania zaobserwowano dla średnich wartości (Rys. 7.19): średnia z sezonu letniego wyniosła -110 W, dla sezonu zimowego 39 W oraz dla całego roku -35 W. Wartość średniej dla całego roku zrównała się bądź nieznacznie przekroczyła wyniki dla opcji przegrody bez elementu aktywowanego termicznie (wartości od -34 W do -35 W). Zostało to spowodowane wzrostem średniej z sezonu letniego, a w konsekwencji zbliżaniem się do wariantu ściany zewnętrznej bez przewodów i jednoczesnym spadkiem średniej z sezonu zimowego, czyli zmniejszeniem się zapotrzebowania na moc ze znakiem dodatnim. Oceniając rozwiązanie przegrody z elementem aktywowanym termicznie pod kątem średnich z sezonów to jest ono korzystniejsze względem przegrody klasycznej, z powodu niższych wartości.



Rys. 7.17. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm



Rys. 7.18. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm

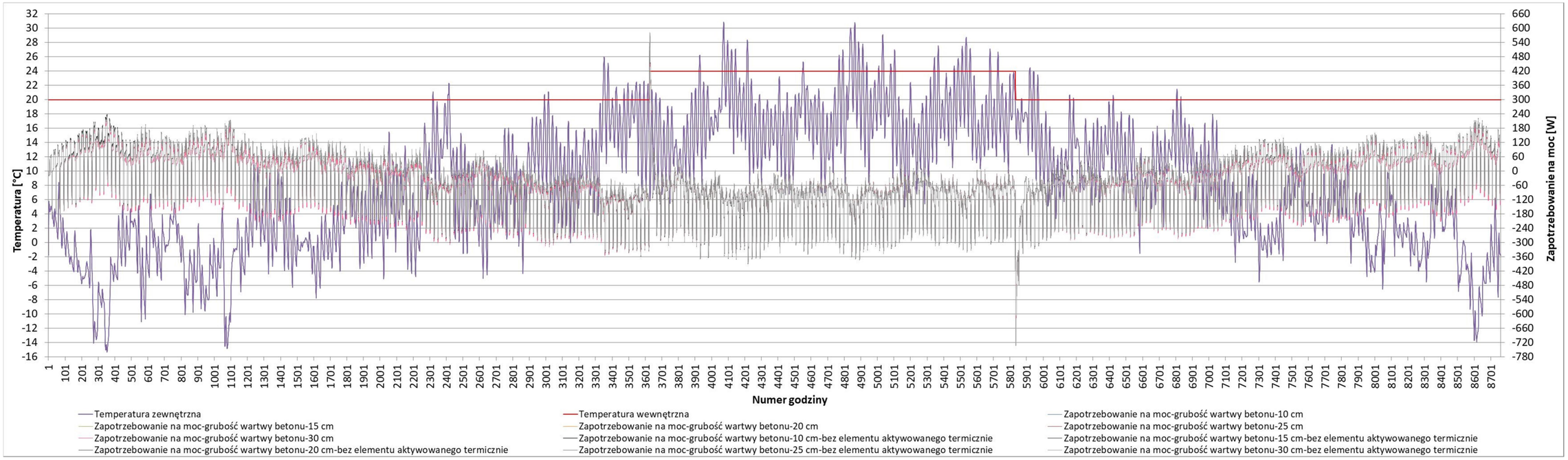


Rys. 7.19. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm

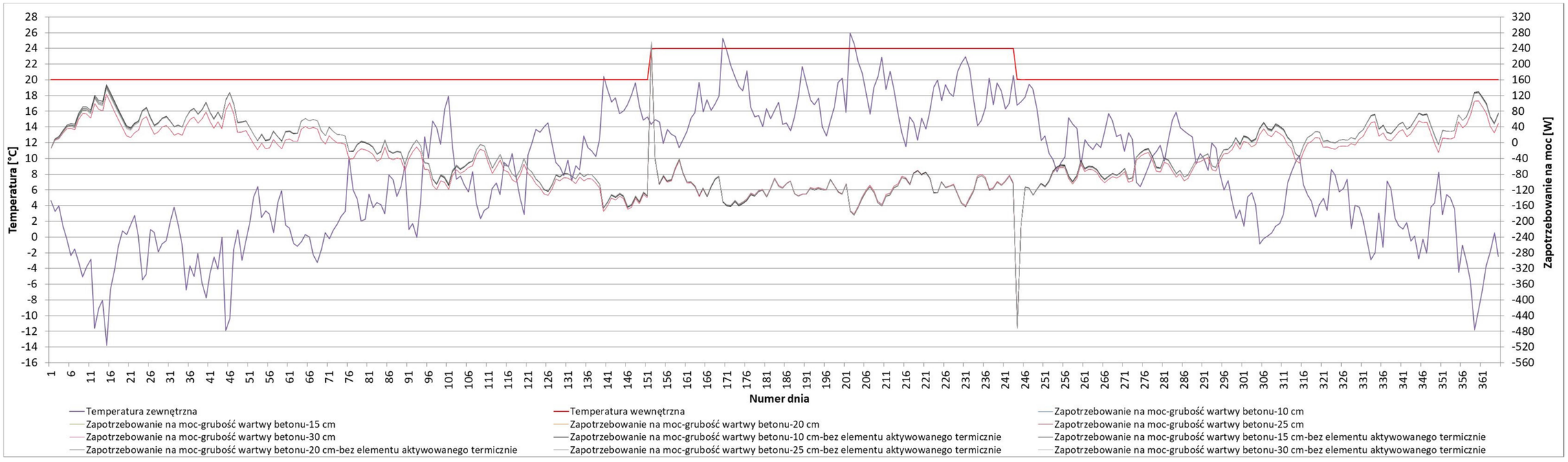
- Temperatura zasilania równa 20°C

W przypadku zasilania pętli wodą o temperaturze równej 20°C przebieg godzinowy oraz dobowy był do siebie zbliżony bez względu na grubość betonu (Rys. 7.20 – Rys. 7.21). Najwyższa wartość wystąpiła w 3627 godzinie równa 562 W, a najniższa wynosząca -721 W o godzinie 5834, które są następstwem wzrostu i spadku wymaganej temperatury wewnętrznej w pomieszczeniu. Wartości te są niższe od wartości ekstremalnych dla opcji przegrody bez przewodów, czyli 581 W oraz -733 W. Dla wartości dobowych wielkości skrajne wyniosły: 247 W (152 dzień) oraz -468 W (244 dzień) w przypadku ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie, czyli niższe niż dla przegrody bez modyfikacji: 256 W oraz -473 W. W sytuacji pominięcia wielkości odbiegających zakres zapotrzebowania na moc wynosił dla przebiegu godzinowego od -384 W do 212 W, a dla dobowego od -181 W do 123 W, które to wartości były niższe niż dla przegrody klasycznej od -388 W do 235 W (przebieg godzinowy) oraz od -184 W do 145 W (przebieg dobowy).

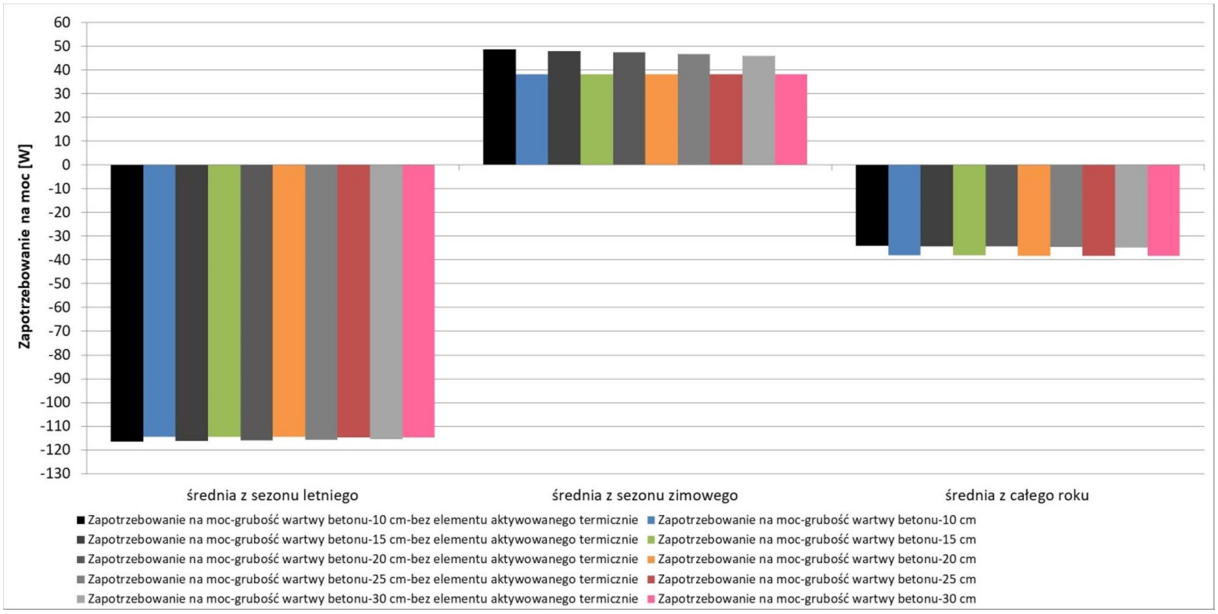
Średnie zapotrzebowanie osiągnęło wartości: -115 W w sezonie letnim, 38 W w sezonie zimowym oraz -38 W w okresie całego roku (Rys. 7.22). Wartości średnie dla przegrody z przewodami w okresie całego roku przekroczyły wartości średnie dla przegrody klasycznej, czyli poziom -34 W – -35 W. Jest to efekt wzrostu średniej wartości w sezonie letnim do zakresu -116 W – -115 W.



Rys. 7.20. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm



Rys. 7.21. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm

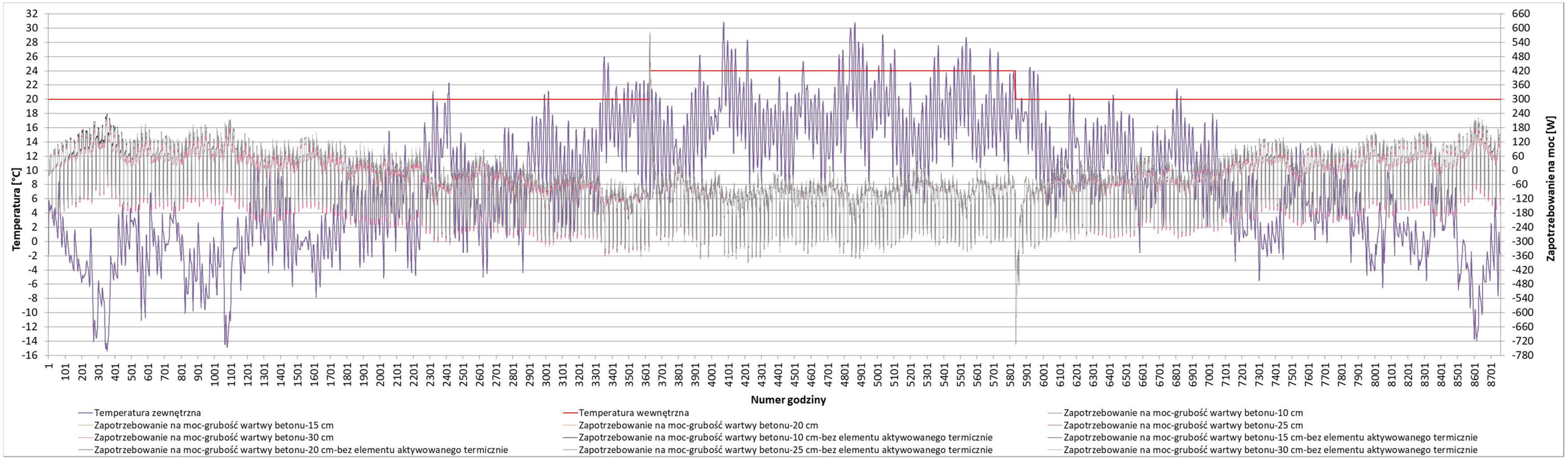


Rys. 7.22. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm

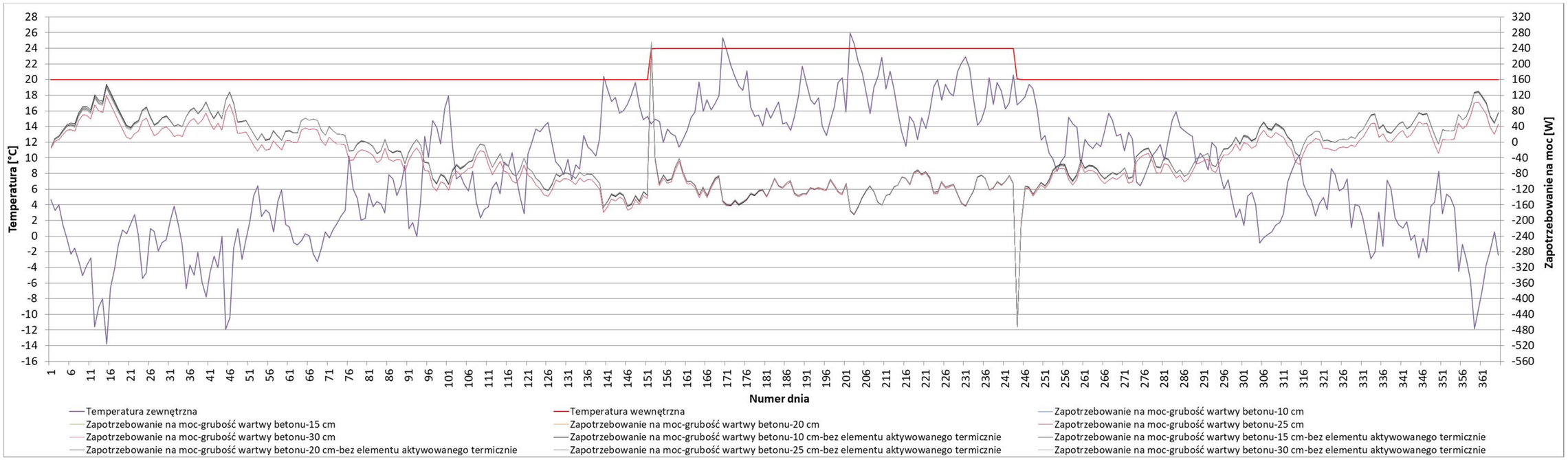
- Temperatura zasilania równa 22°C

Dla temperatury zasilania równej 22°C przebieg godzinowy był do siebie zbliżony bez względu na grubość warstwy betonu (Rys. 7.23) podobnie jak dla przebiegu dobowego (Rys. 7.24). Zarejestrowano wartości ekstremalne: maksimum 557 W (3627 godzina), 242 W (152 doba) oraz minimum -726 W (5834 godzina), -473 W (244 doba). Nie uwzględniając powyższych wielkości osiągnięto wartości z przedziału: -388 W – 208 W (przebieg godzinowy) oraz -186 – 118 W (przebieg dobowy). Porównując powyższe wartości z wynikami dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie zauważono wzrost zapotrzebowania na moc na cele chłodnicze osiągając takie same wartości, czyli -473 W (minimum dla przebiegu dobowego), -388 W (dolna wartość przedziału dla przebiegu godzinowego), bądź je przekraczając jak wartość -184 W (dolna wartość przedziału dla przebiegu dobowego).

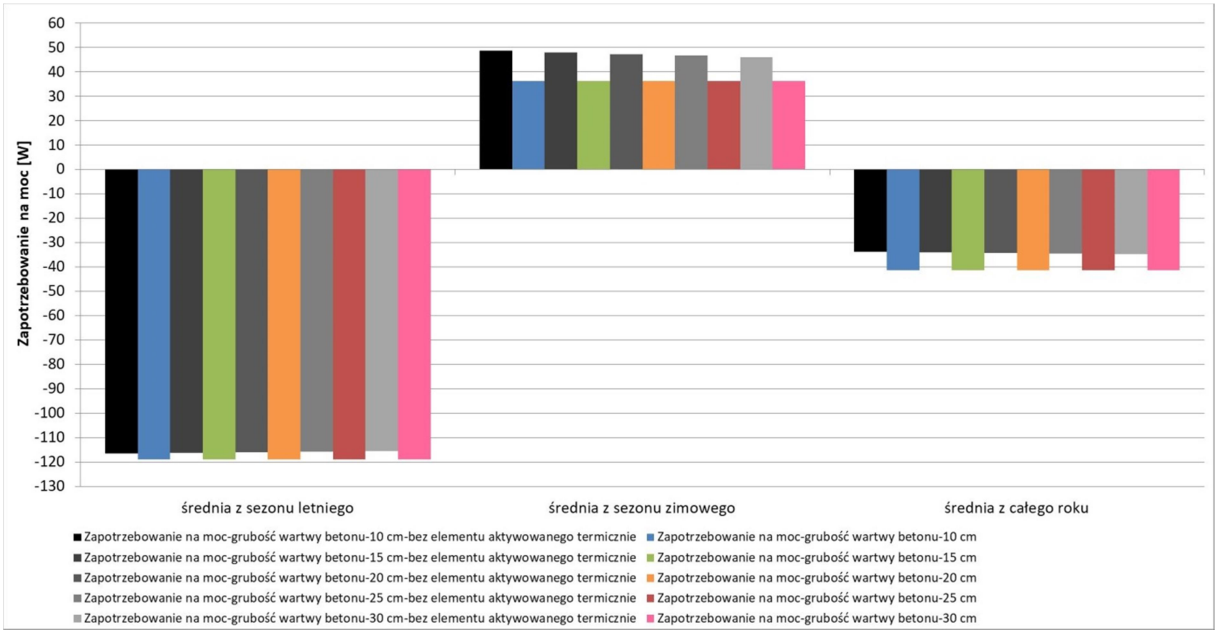
W przypadku średniego zapotrzebowania na moc dla przegrody z przewodami osiągnięto wartości: -119 W (sezon letni), 36 W (sezon zimowy), -41 W (cały rok) (Rys. 7.25), jedynie dla sezonu zimowego wartość ta jest niższa od wartości dla wariantu bez przewodów, czyli 46 W (beton – 30 cm) – 49 W (beton – 10 cm). W sytuacji wartości średniej z sezonu letniego jest on wyższy od rezultatu dla ściany zewnętrznej bez elementu aktywowanego termicznie, co przyczyniło się do takiego samego efektu w przypadku średniej z całego roku.



Rys. 7.23. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm



Rys. 7.24. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm



Rys. 7.25. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm

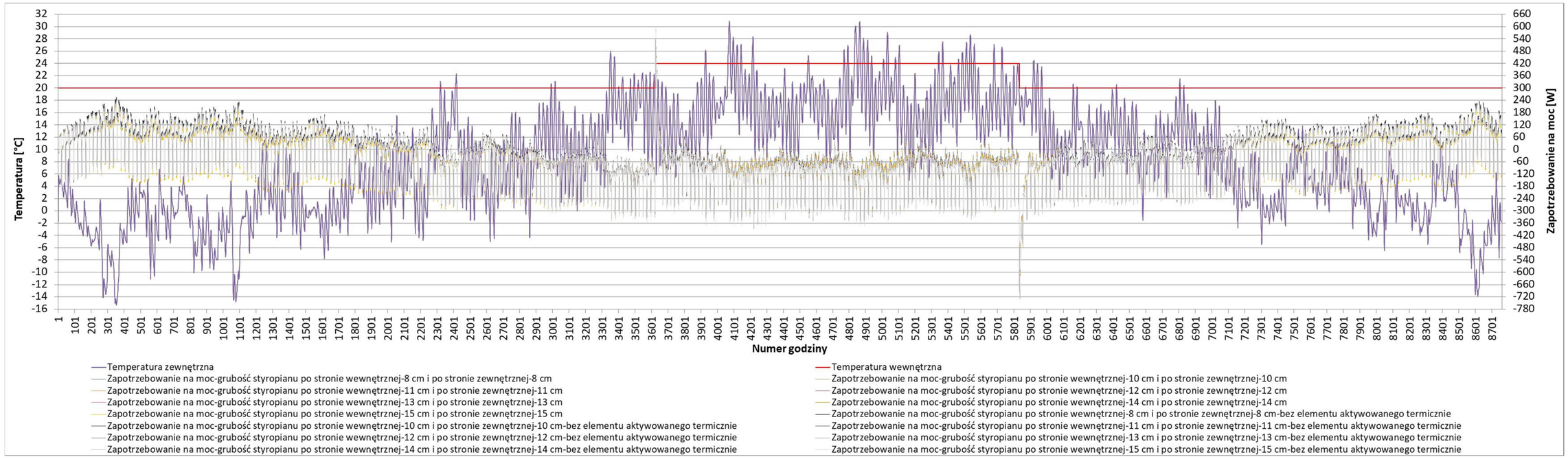
7.2.3. Zużycie energii a grubość styropianu

W przypadku grubości styropianu rozważono wartości: 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm o współczynniku przewodzenia ciepła równym 0,031 W/(m·K), który to został zamontowany na ścianie zewnętrznej o grubości warstwy betonu 15 cm i temperaturze zasilania równej: 16°C, 18°C, 20°C oraz 22°C. Wyznaczono również wartości dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie. Wyniki przedstawiono za pomocą wykresów dla ściany zewnętrznej dla pomieszczenia nr 5 – pokoju (Rys. 7.26 – Rys. 7.37).

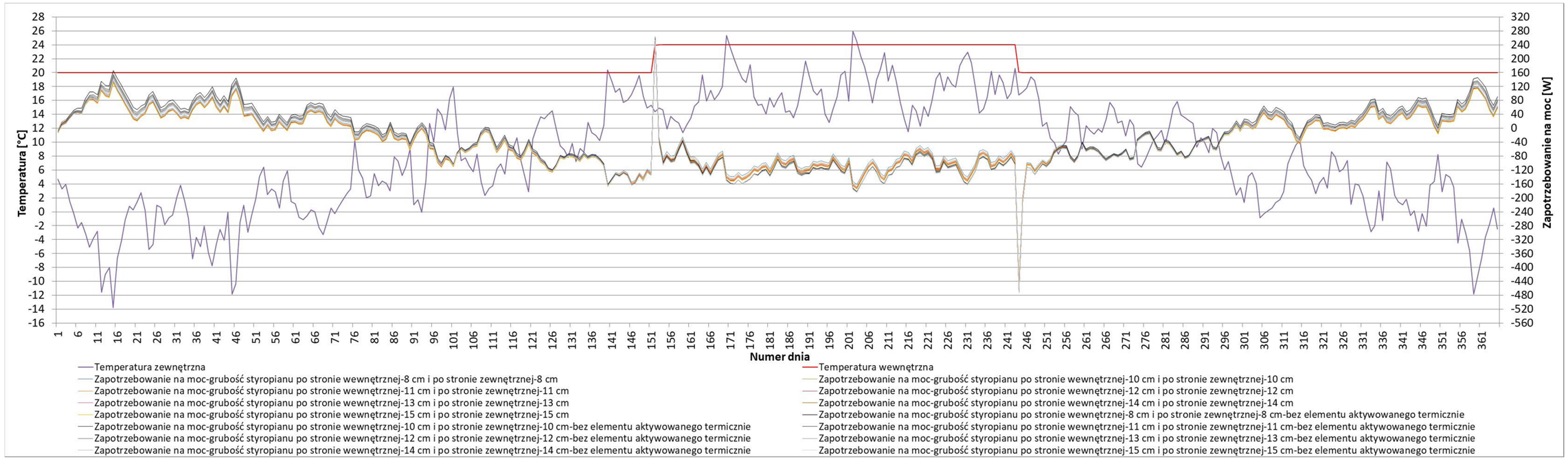
- Temperatura zasilania równa 16°C

Przebieg godzinowy jest porównywalny niezależnie od grubości styropianu dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie, podobnie jak krzywa dobowa (Rys. 7.26 i Rys. 7.27). W przypadku wykresów sporządzonych dla wariantów ściany zewnętrznej bez przewodów zanotowano wartość maksymalną 579 W (dla przebiegu godzinowego) i 254 W (dla przebiegu dobowego) oraz minimalną -733 W (dla przebiegu godzinowego) i -473 W (dla przebiegu dobowego). Wartości te są wyższe niż dla zmodyfikowanej ściany, czyli wartości 570 W i -711 W (dla przebiegu godzinowego) oraz 256 W i -459 W (dla przebiegu dobowego). Taka sama sytuacja wystąpiła dla zakresów wartości (pomijając wymienione wcześniej wielkości skrajne) zapotrzebowania na moc. Zakres wartości temperatury dla przegrody z przewodami wynosi -377 W – 221 W (przebieg godzinowy) i -175 W – 132 W (przebieg dobowy), a dla przegrody klasycznej -388 W – 245 W (przebieg godzinowy) i -185 W – 166 W (przebieg dobowy).

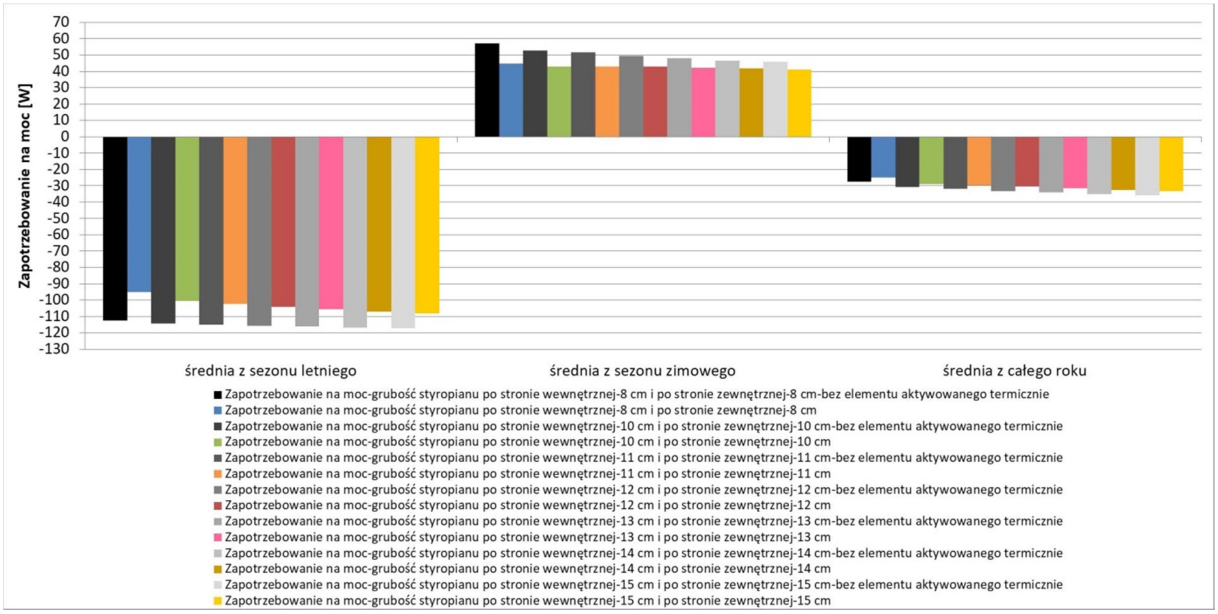
Zauważalną różnicę pomiędzy danymi grubościami styropianu odnotowano dla średnich wartości zapotrzebowania na moc dla poszczególnych sezonów. W przypadku przegrody z elementem aktywowanym termicznie dla grubości styropianu 8 cm po obu stronach przegrody osiągnięto najniższą wartość w sezonie letnim równą -95 W i w okresie całego roku -25 W oraz najwyższą w sezonie zimowym 45 W. W okresie zimowym najniższa wartość wystąpiła dla grubości izolacji równej 15 cm 41 W, wówczas latem zanotowano wartość najwyższą -108 W, analogicznie jak dla całego roku równą -33 W (Rys. 7.28). Oceniając ścianę zewnętrzną bez przewodów dla grubości izolacji 8 cm po obu stronach przegrody również odnotowano najniższą wartość w sezonie letnim równą -113 W i w okresie całego roku -28 W oraz najwyższą w sezonie zimowym 57 W. Dla grubości izolacji równej 15 cm średnie wartości wyniosły: -117 W (sezon letni), 46 W (sezon zimowy) oraz -36 W (okres całego roku).



Rys. 7.26. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm



Rys. 7.27. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm

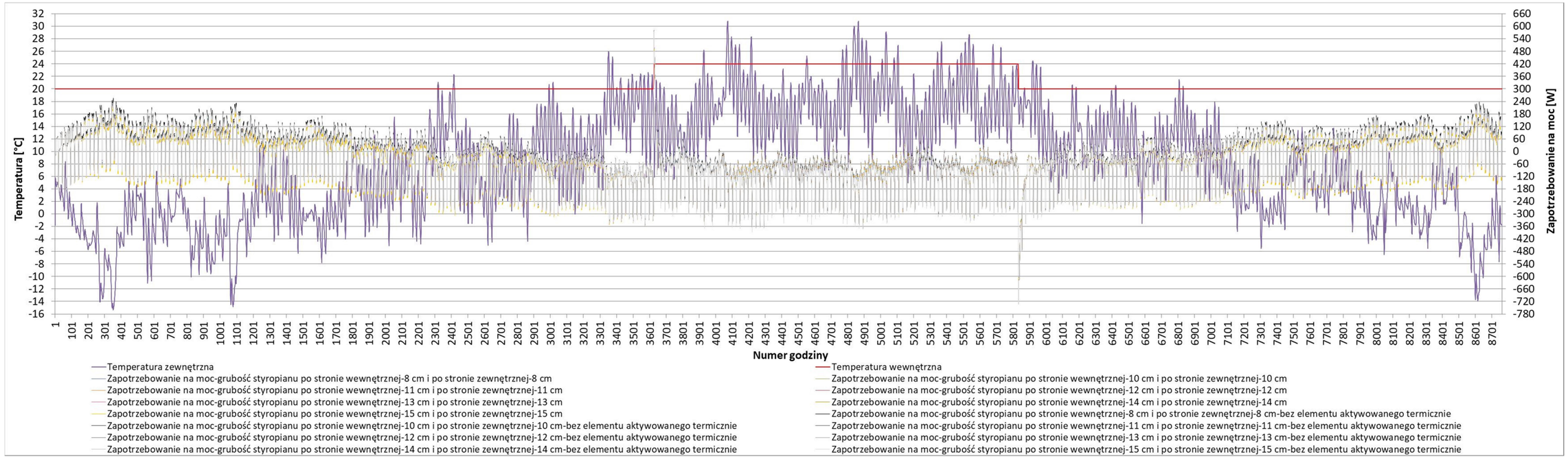


Rys. 7.28. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm

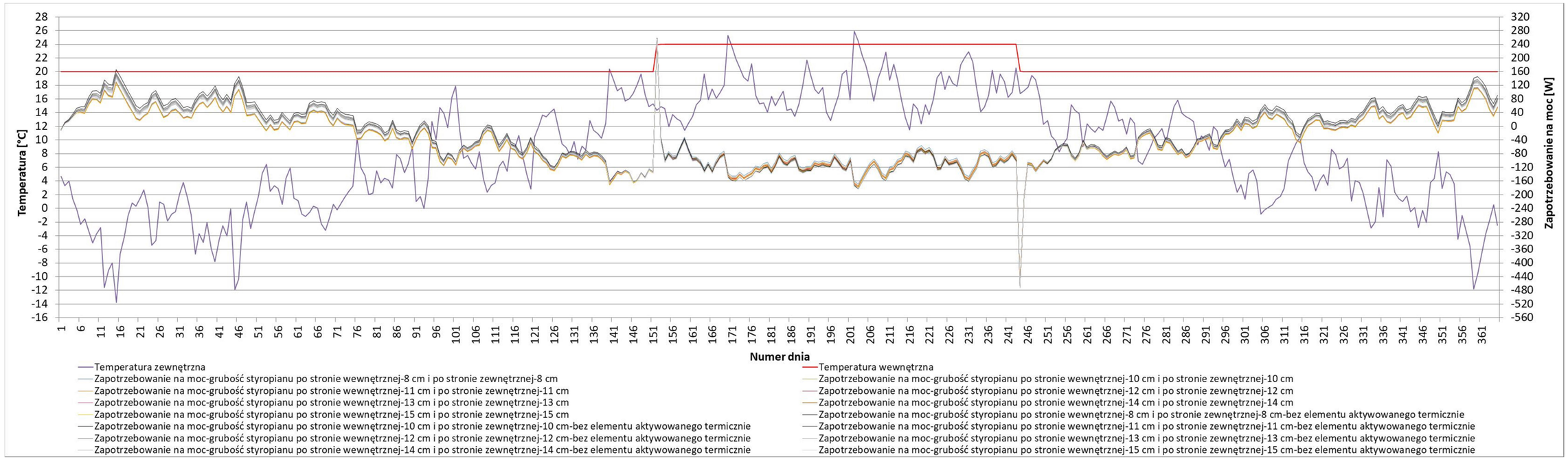
- Temperatura zasilania równa 18°C

Godzinowe i dobowe zapotrzebowanie na moc przedstawiono na poniższych wykresach (Rys. 7.29 i Rys. 7.30). Przebieg godzinowy dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie można scharakteryzować wartościami: 566 W (maksimum), -718 W (minimum), zakres (pomijając wielkości skrajne) -381 W – 216 W, natomiast przebieg dobowy za pomocą wielkości: 251 W i -465 W (wartości ekstremalne) oraz przedział -179 W – 127 W. Wartości te są niższe niż wspomniane wcześniej wartości dla wariantu klasycznej przegrody, czyli przebieg godzinowy z wartościami ekstremalnymi 579 W i -733 W oraz przedziałem od -388 W do 245 W, a dobowy z wartościami ekstremalnymi 254 W i -473 W oraz zakresem -185 W – 166 W.

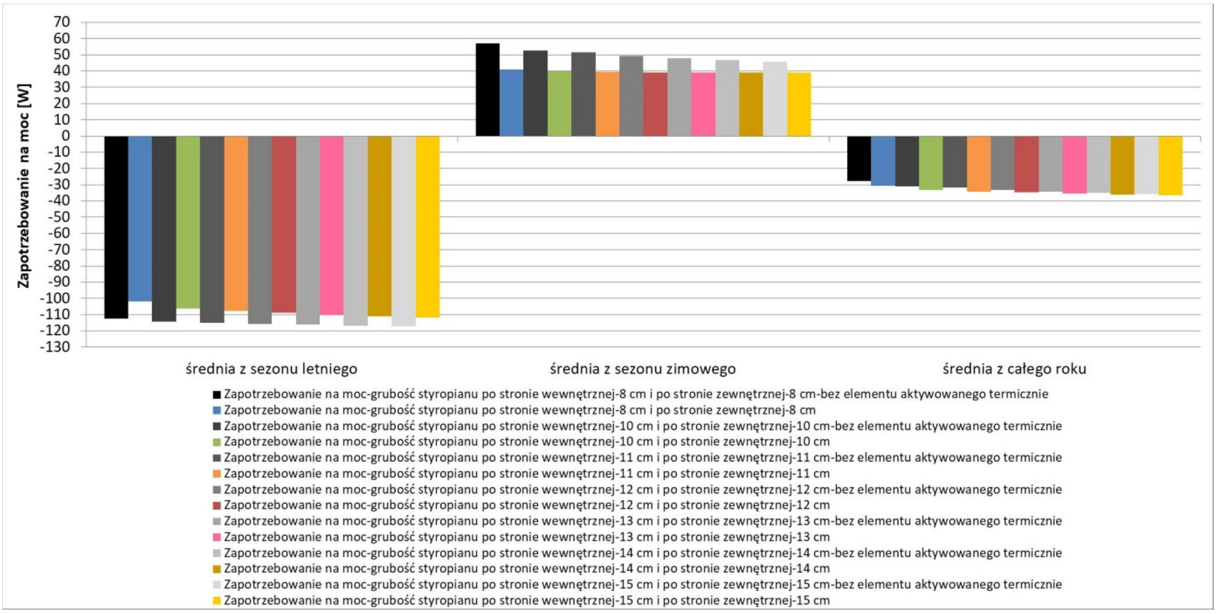
Widoczną różnicę pomiędzy poszczególnymi opcjami z różną grubością styropianu zauważono dla średnich wartości (Rys. 7.31). W sezonie letnim dla ściany zewnętrznej z wbudowanymi przewodami zaobserwowano wartość minimalną równą -102 W dla 8 cm grubości styropianu, a maksymalną -112 W dla 15 cm. Dla tej samej grubości styropianu w okresie zimowym zanotowano najniższą wartość na poziomie 39 W, a dla 8 cm najwyższą równą 41 W. Dla średniej z całego roku wartości ekstremalne wyniosły -31 W (8 cm) oraz -37 W (15 cm). Porównując wartości osiągnięte dla przegrody z i bez elementu aktywowanego termicznie w przypadku sezonów, wartości wyższe wystąpiły dla 2 wariantu: -113 W (sezon letni) i 57 W (sezon zimowy) dla 8 cm grubości styropianu oraz -117 W (lato) i 46 W (zima) dla 15 cm. W sytuacji średniej z całego roku wartości są niższe dla ściany zewnętrznej bez przewodów, gdyż jest to spowodowane uśrednieniem wszystkich wartości (dodatnich i ujemnych)w ciągu roku.



Rys. 7.29. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm



Rys. 7.30. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm

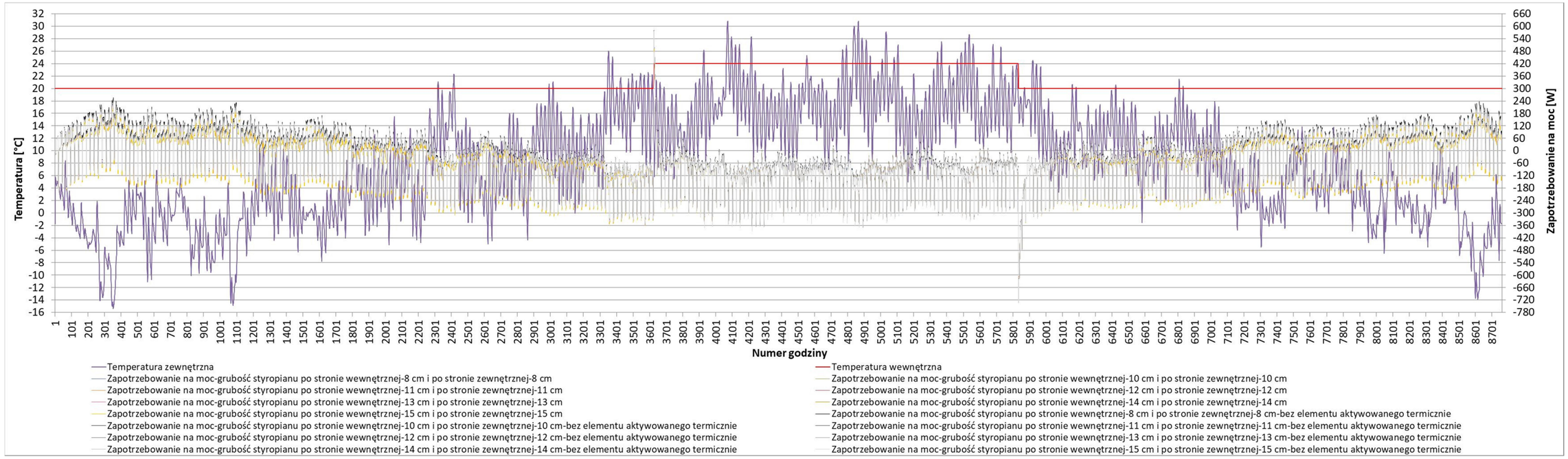


Rys. 7.31. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm

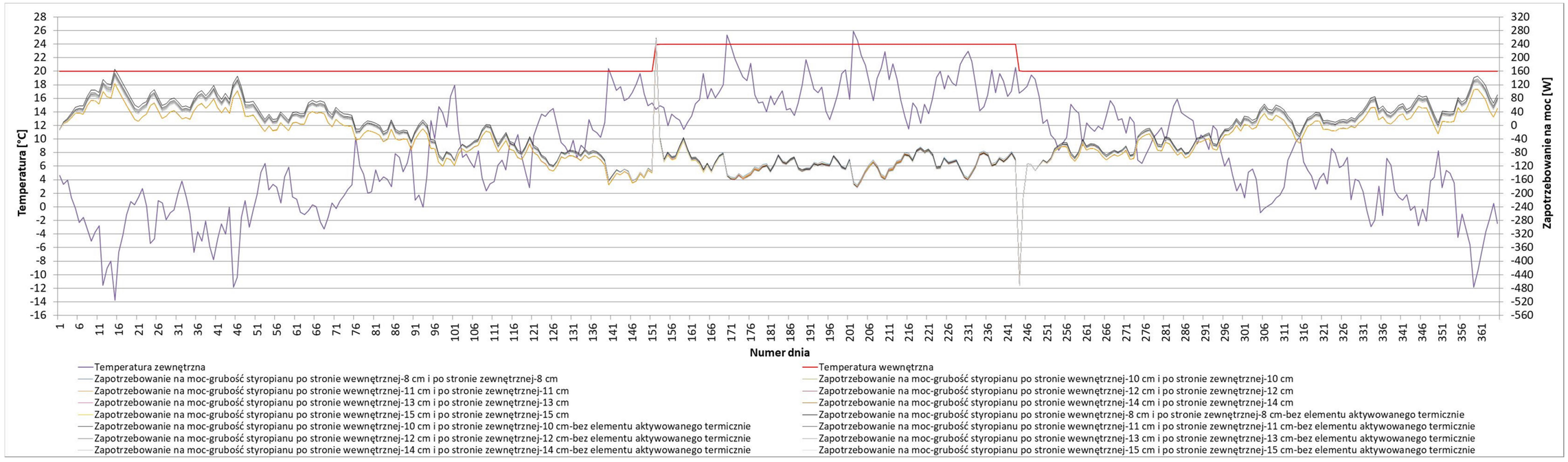
- Temperatura zasilania równa 20°C

Godzinowe i dobowe zapotrzebowanie na moc dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie (Rys. 7.32 i Rys. 7.33) osiągnęło wartości ekstremalne równe: 562 W i -722 W (przebieg godzinowy) oraz 247 W i -469 W (przebieg dobowy), a pomijając je wartości z przedziałów: -385 W – 212 W oraz -183 W – 123 W. Nakładając na te przebiegi wykresy dla przegrody bez przewodów zauważono, że wartości te są niższe.

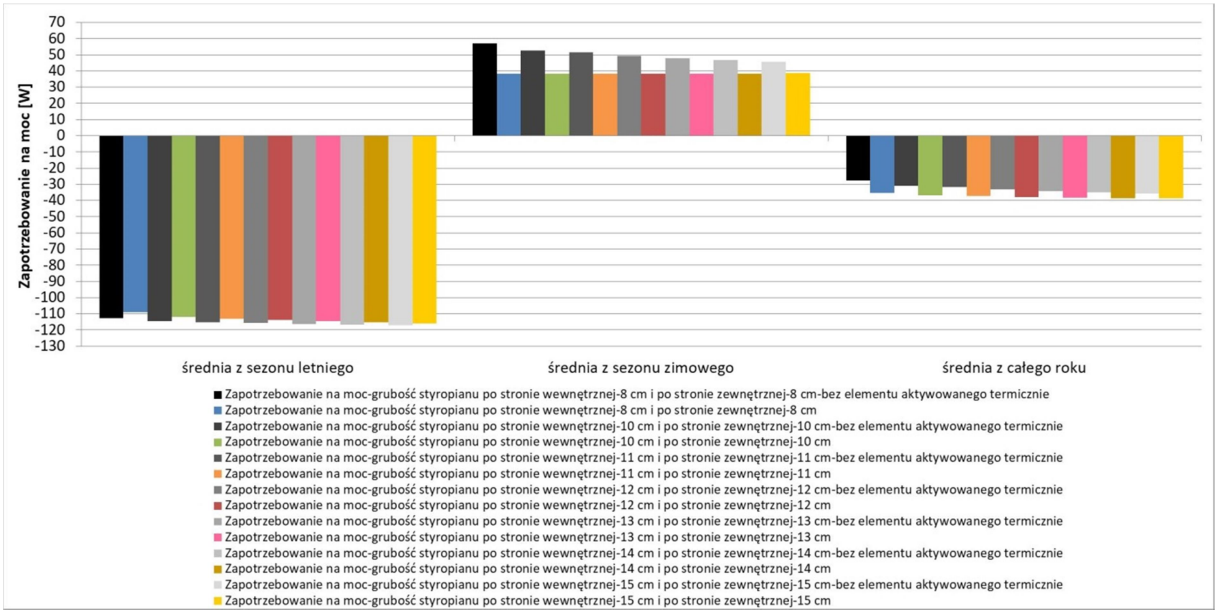
Dostrzegalne różnice pomiędzy wartościami wyznaczonymi dla danych grubości styropianu zauważono dla średnich wartości zapotrzebowania na moc dla sezonu letniego i całego roku (Rys. 7.34). W przypadku przegrody z elementem aktywowanym termicznie były to wartości dla sezonu letniego: -109 W dla 8 cm grubości styropianu, a dla 15 cm warstwy izolacji -116W, co dla całego roku daje wartości: -35 W dla 8 cm i -39 W dla 15 cm. W sezonie zimowym dla wszystkich grubości styropianu dla zmodyfikowanej przegrody średnie wartości wyniosły w przybliżeniu 38 W, które to wartości są niższe od wartości uzyskanych dla ściany zewnętrznej bez przewodów, czyli 57 W dla 8 cm grubości styropianu i 46 W dla 15 cm. Analogicznie wartości dla sezonu letniego były niższe dla ściany zewnętrznej z wbudowanymi przewodami w porównaniu do rozwiązania bez nich, jednak z powodu niewielkich rozbieżności między nimi, średnia z całego roku dla przegrody z elementem aktywowanymi termicznie przekroczyła poziom osiągnięty dla przegrody klasycznej (-28 W dla 8 cm i -36 W dla 15 cm).



Rys. 7.32. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm



Rys. 7.33. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm

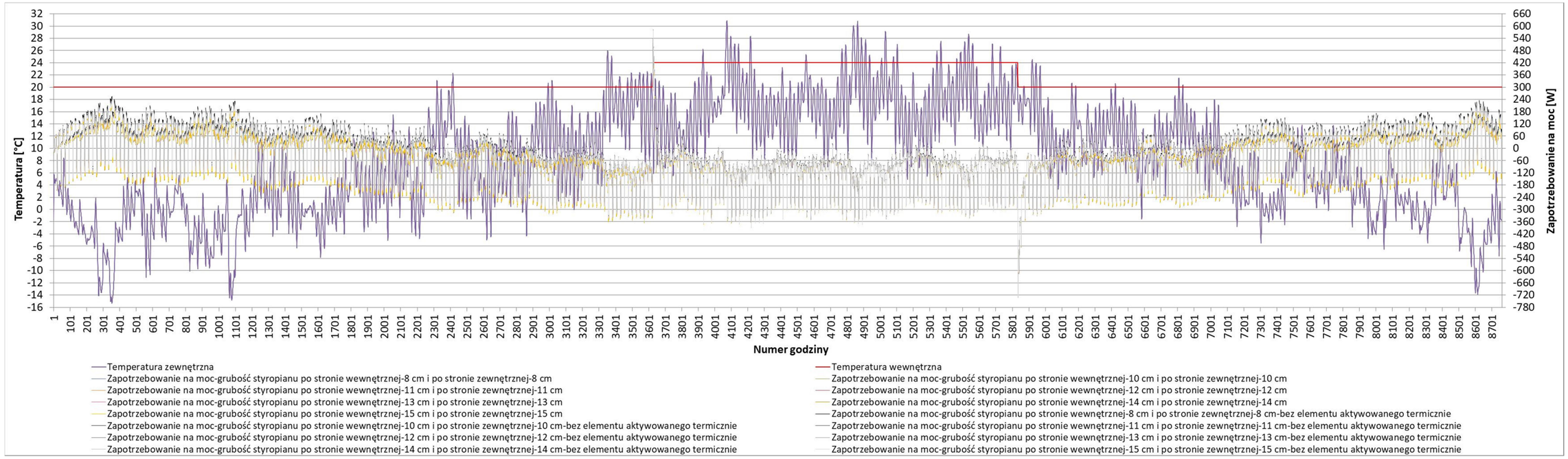


Rys. 7.34. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm

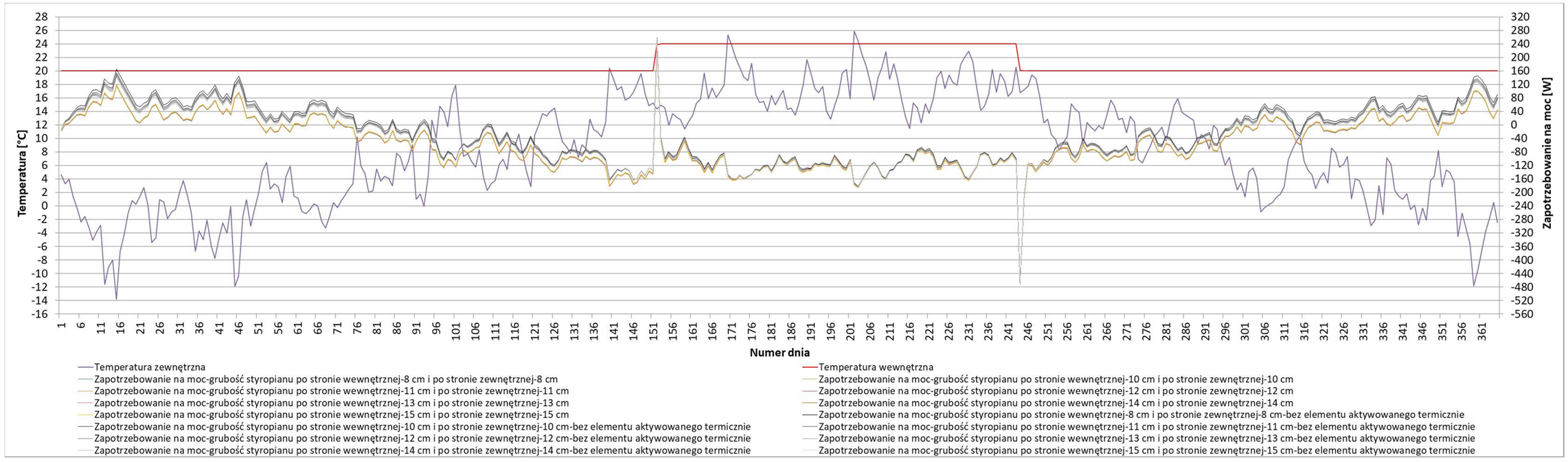
- Temperatura zasilania równa 22°C

W kwestii zasilania pętli wodą o temperaturze 22°C krzywa godzinowa i dobowa (Rys. 7.35 i Rys. 7.36) dla ściany zewnętrznej z przewodami osiągnęła wartości od -389 W do 208 W (dla przebiegu godzinowego i z pominięciem wartości ekstremalnych 558 W i -726 W) oraz od -186 W do 119 W (dla przebiegu dobowego i nie uwzględniając wartości skrajnych 242 W i -473 W). W porównaniu do wykresu sporządzonego dla przegrody bez elementy aktywowanego termicznie dolna wartość zakresów dla rozwiązania klasycznego jest niższa (węższa) o 1 W, czyli -388 W – 245 W (dla godzinowego) oraz -185 W – 166 W (dla dobowego), pozostałe wartości nadal pozostają wyższe.

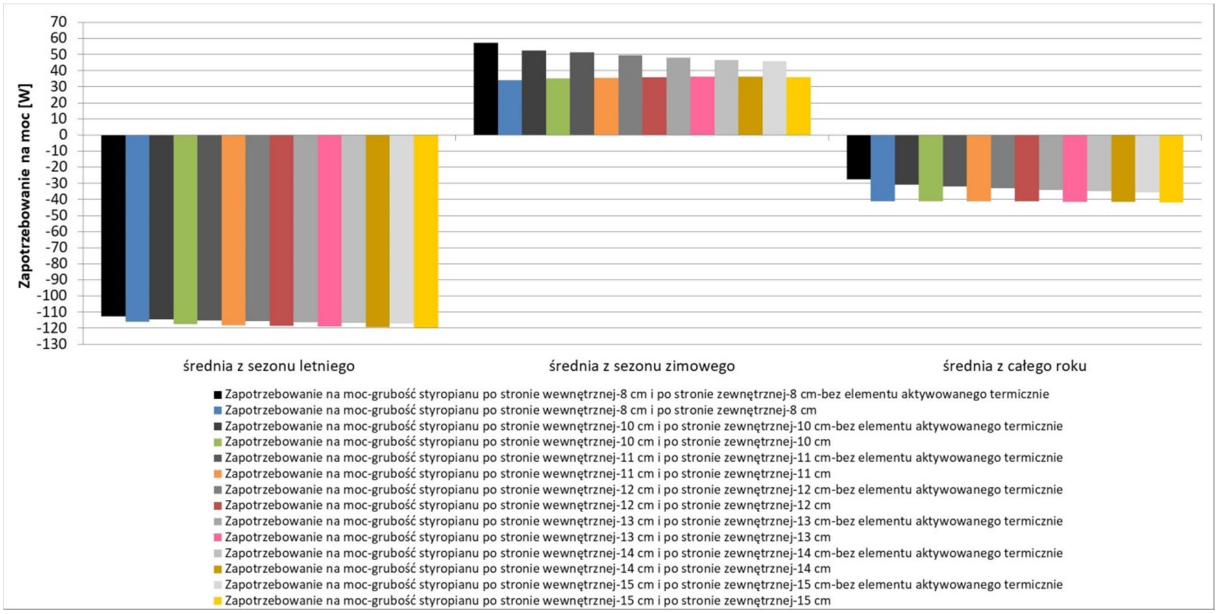
Różnice pomiędzy poszczególnymi wariantami można zauważyć dla średniej wartości zapotrzebowania na moc (Rys. 7.37). W przypadku zmodyfikowanej przegrody dla sezonu letniego otrzymano wartości: -116 W dla grubości styropianu równej 8 cm i -120 W dla 15 cm, a dla sezonu zimowego 34 W (8 cm) i 36 W (15 cm), stąd dla całego roku wartości te wyniosły odpowiednio -41 W i -42 W. Przegroda bez elementu aktywowanego termicznie osiągnęła wartości dla sezonu letniego niższe od wartości dla ściany z przewodami. Zostało to spowodowane przyjętą temperaturą zasilania przewodów, w konsekwencji uzyskano również niższe średnie wartości dla całego roku.



Rys. 7.35. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm



Rys. 7.36. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm



Rys. 7.37. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm

7.2.4. Zużycie energii a współczynnik przewodzenia ciepła styropianu

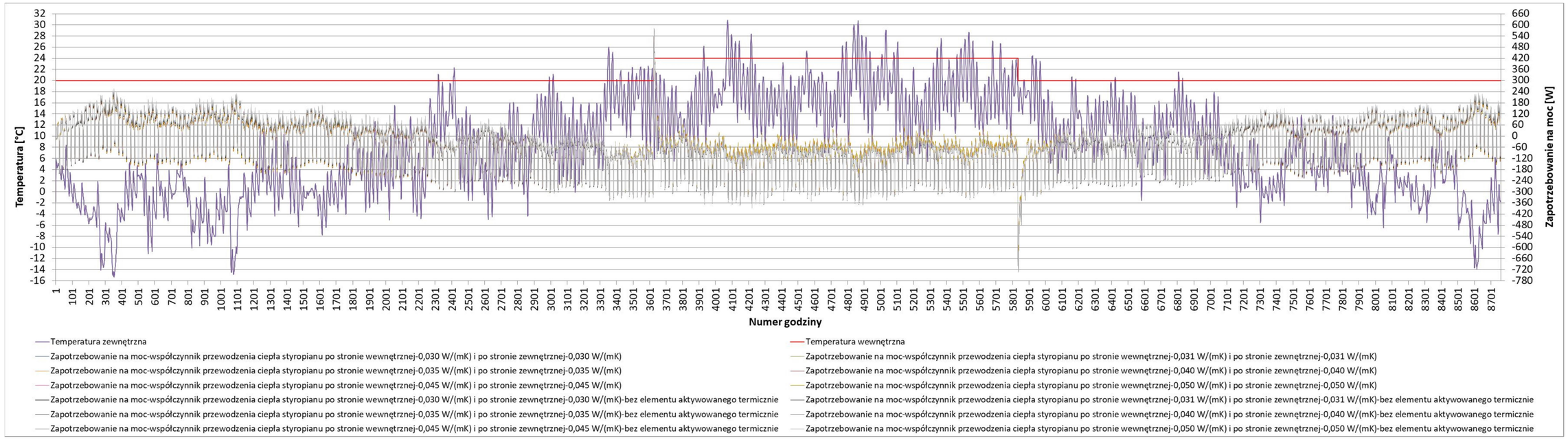
Dla wariantów współczynnika przewodzenia ciepła styropianu równych: 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K) wyznaczono przebieg zapotrzebowania na moc dla wartości godzinowych i dobowych. Obliczono również średnie wartości dla sezonu letniego, zimowego i całego roku. Analiza objęła ścianę zewnętrzną z warstwą betonu o grubości 15 cm zaizolowaną z obu stron styropianem o grubości 13 cm i zasilaną wodą o temperaturze: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C oraz sytuację bez elementu aktywowanego termicznie. Poniższe wykresy odnoszą się do ściany zewnętrznej dla pomieszczenia nr 5 – pokoju (Rys. 7.38 – Rys. 7.49).

- Temperatura zasilania równa 16°C

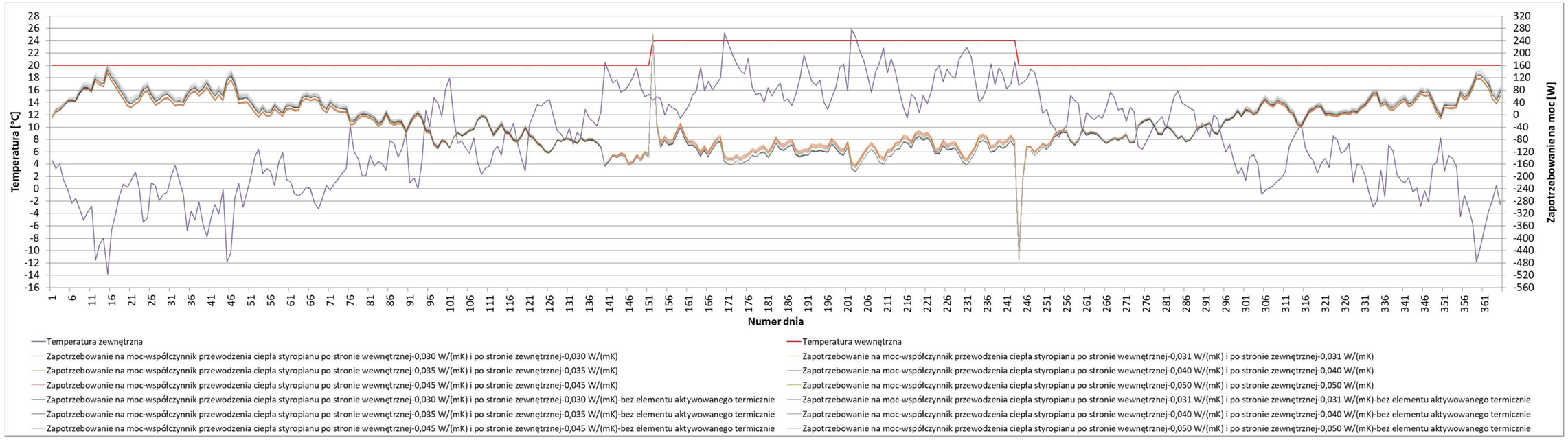
Przebieg godzinowy oraz dobowy dla temperatury zasilania równej 16°C jest do siebie zbliżony bez względu na różne współczynniki przewodzenia ciepła warstwy izolacyjnej (Rys. 7.38 i Rys. 7.39). Wartość maksymalna dla przebiegu godzinowego osiągnęła poziom 571 W, natomiast minimalna -711 W. Pomijając te wartości skrajne zanotowano zakres wartości od -375 W do 226 W, w przypadku przebiegu dobowego był to przedział od -172 W do 137 W nie uwzględniając wartości ekstremalnych: -459 W i 263 W. W przypadku przegrody bez elementu aktywowanego termicznie zanotowano wyższe wartości w zakresach: -388 W – 255 W (dla godzinowego) oraz -184 W – 165 W (dla dobowego).

Dla średnich wartości zapotrzebowania na moc można zauważyć różne wartości (Rys. 7.40). Wartość maksymalną dla ściany zewnętrznej z przewodami zanotowano: dla sezonu

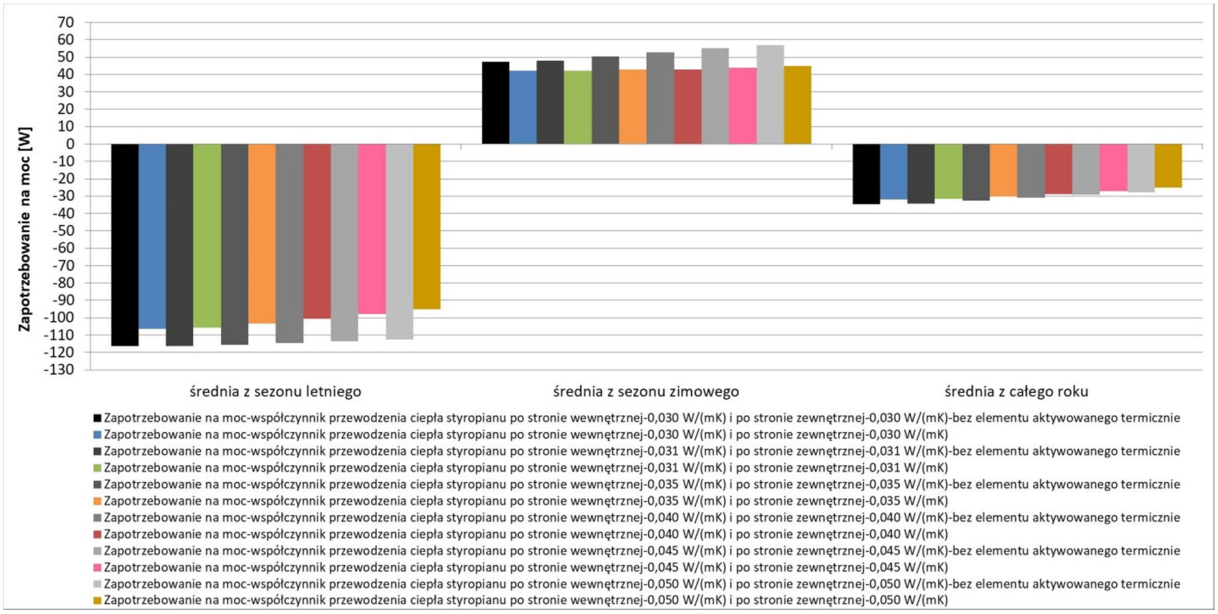
letniego dla współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,030 W/(m·K) – wartość -106 W, dla tego samego wariantu wartość najwyższą dla całego roku -32 W, a dla sezonu zimowego 45 W dla 0,050 W/(m·K). Wartości najniższe zanotowano w przypadku sezonu letniego i całego roku dla 0,050 W/(m·K) równe odpowiednio -95 W i -25 W, a dla sezonu zimowego 42 W dla 0,030 W/(m·K). W sytuacji rozwiązania bez przewodów osiągnięto wyższe wartości. Dla współczynnika przewodzenia ciepła wynoszącego 0,030 W/(m·K) zarejestrowano: -116 W (dla sezonu letniego), 47 W (dla sezonu zimowego) oraz -35 W (dla całego roku). Najwyższa wartość dla okresu letniego wystąpiła dla współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,050 W/(m·K) i wyniosła 57 W, dla tej samej wartości współczynnika przewodzenia ciepła zanotowano -113 W (dla sezonu letniego) oraz -28 W (dla całego roku).



Rys. 7.38. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)



Rys. 7.39. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)

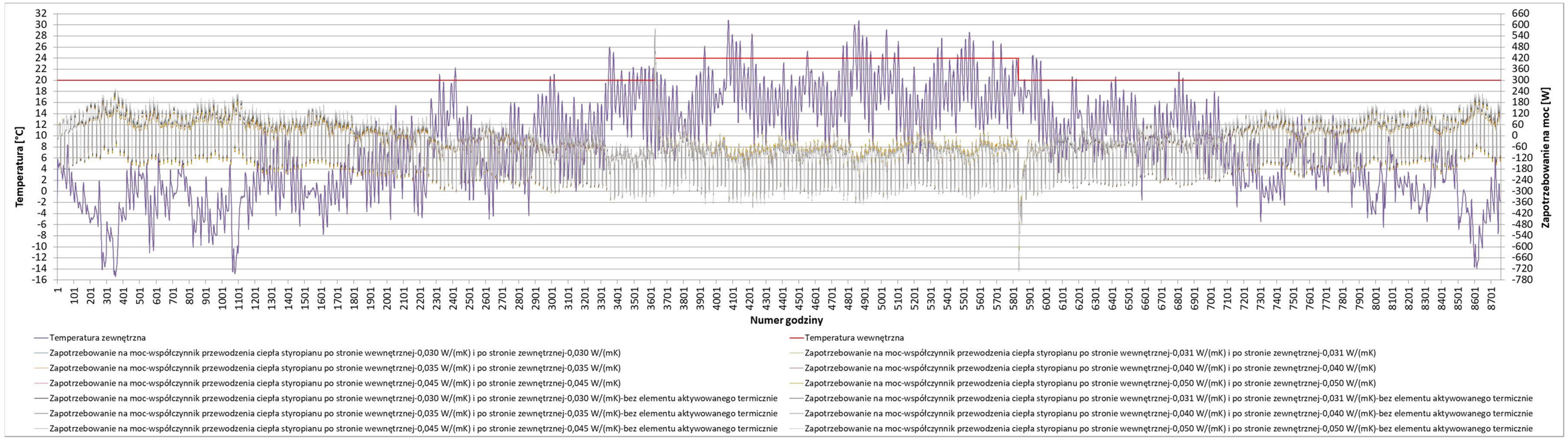


Rys. 7.40. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)

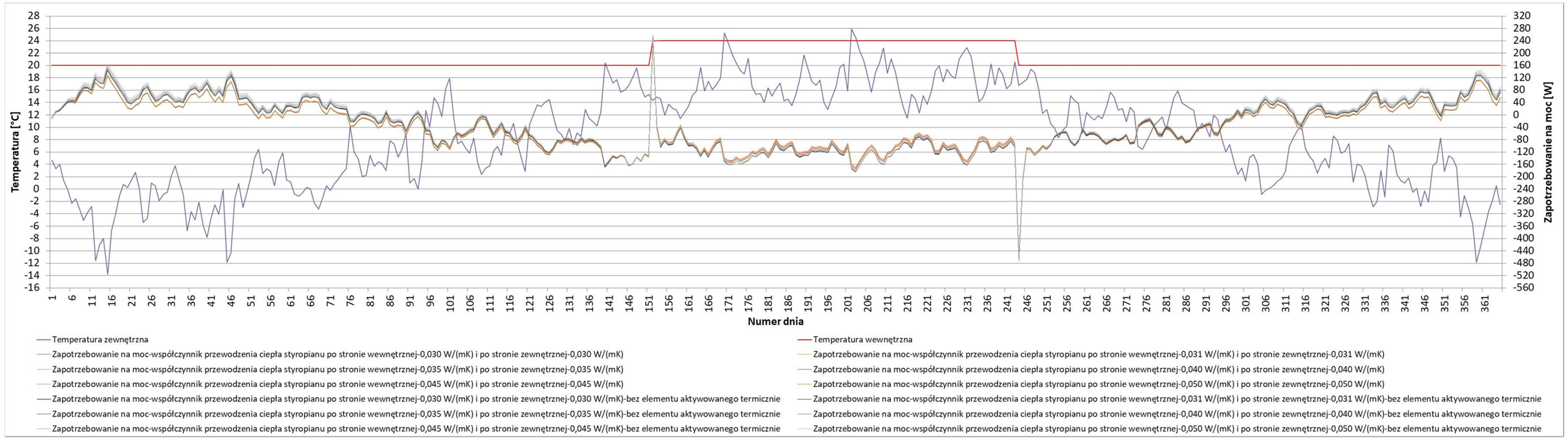
- Temperatura zasilania równa 18°C

Przebiegi dla wartości godzinowych i dobowych są do siebie podobne (Rys. 7.41 i Rys. 7.42). Dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie zarejestrowano wartości ekstremalne: 571 W (maksimum) i -716 W (minimum) dla godzinowego oraz 256 W (maksimum) i -463 W (minimum) dla dobowego. Pomijając wartości ekstremalne osiągnięto wartości z zakresu: -379 W – 219 W (dla godzinowego) oraz -177 W – 130 W (dla dobowego). Wartości te w porównaniu do krzywej sporządzonej dla rozwiązania bez przewodów są niższe.

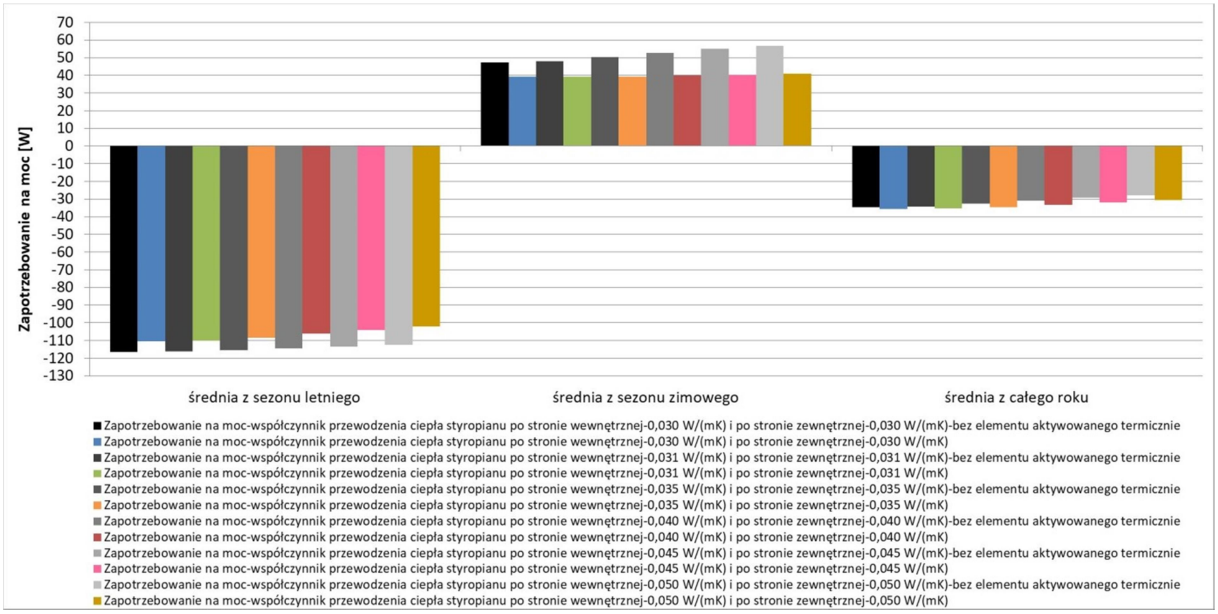
W przypadku ściany zewnętrznej z przewodami dla współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,030 W/(m·K) dla wielkości średnich zaobserwowano wartość maksymalną z sezonu letniego równą -111 W i minimalną z sezonu zimowego 39 W oraz maksymalną z całego roku -36 W (Rys. 7.43). Dla współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,050 W/(m·K) osiągnięto wartość minimalną dla sezonu letniego równą -102 W i dla całego roku -31 W, a dla sezonu zimowego 41 W (maksimum). W sytuacji przegrody bez elementu aktywowanego termicznie osiągnięto wartości wyższe od rozwiązania z przewodami dla sezonu letniego i zimowego. W przypadku średniej z całego roku sytuacja była odwrotna i została spowodowana wzrostem wartości średniej z okresu letniego.



Rys. 7.41. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)



Rys. 7.42. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)

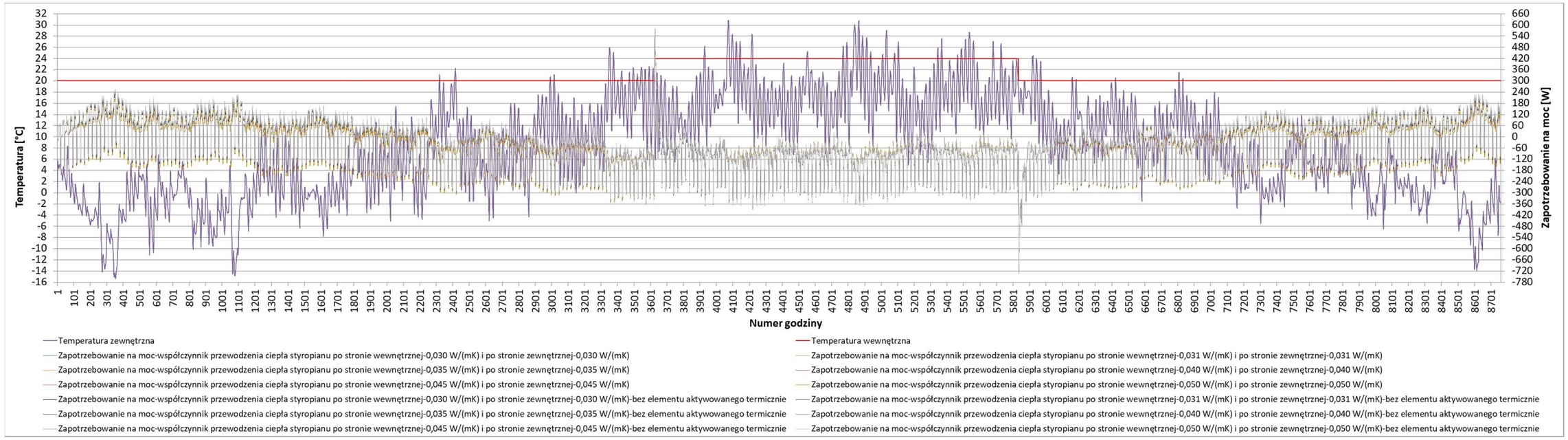


Rys. 7.43. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)

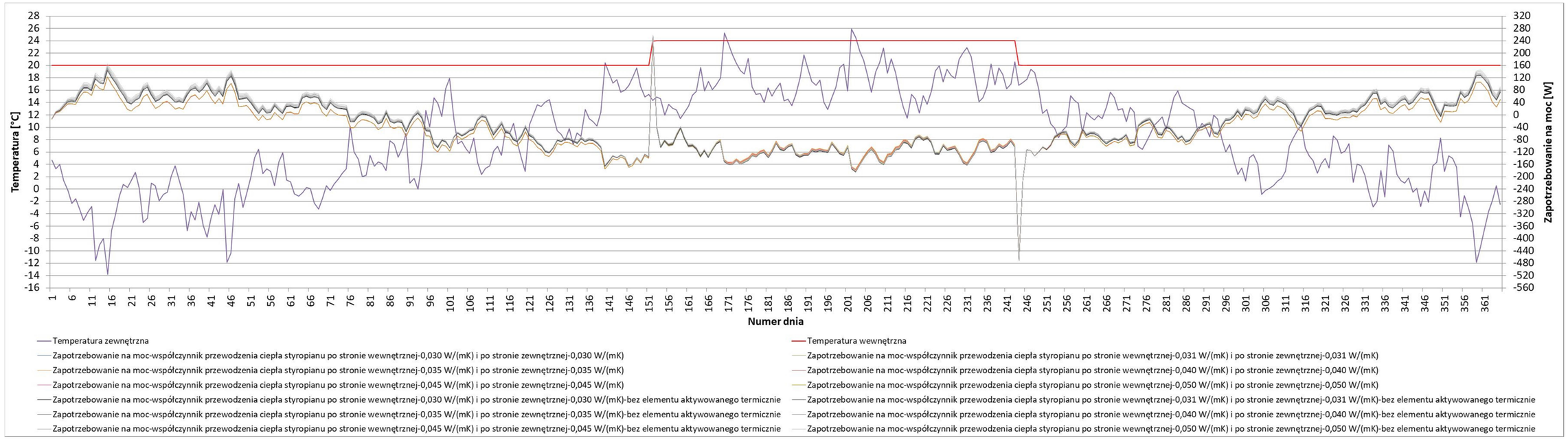
- Temperatura zasilania równa 20°C

Na poniższych wykresach (Rys. 7.44 i Rys. 7.45) przedstawiono przebieg godzinowy i dobowy. Obie krzywe są do siebie zbliżone. W przypadku przegrody z elementem aktywowanym termicznie zanotowano wartości z przedziału od -384 W do 212 W (pomijając wartości skrajne 564 W i -721 W) dla przebiegu godzinowego oraz od -181 W do 123 W (nie uwzględniając wartości 247 W i -468 W) dla przebiegu dobowego. Wartości te są niższe od poziomu osiągniętego przez rozwiązanie bez przewodów.

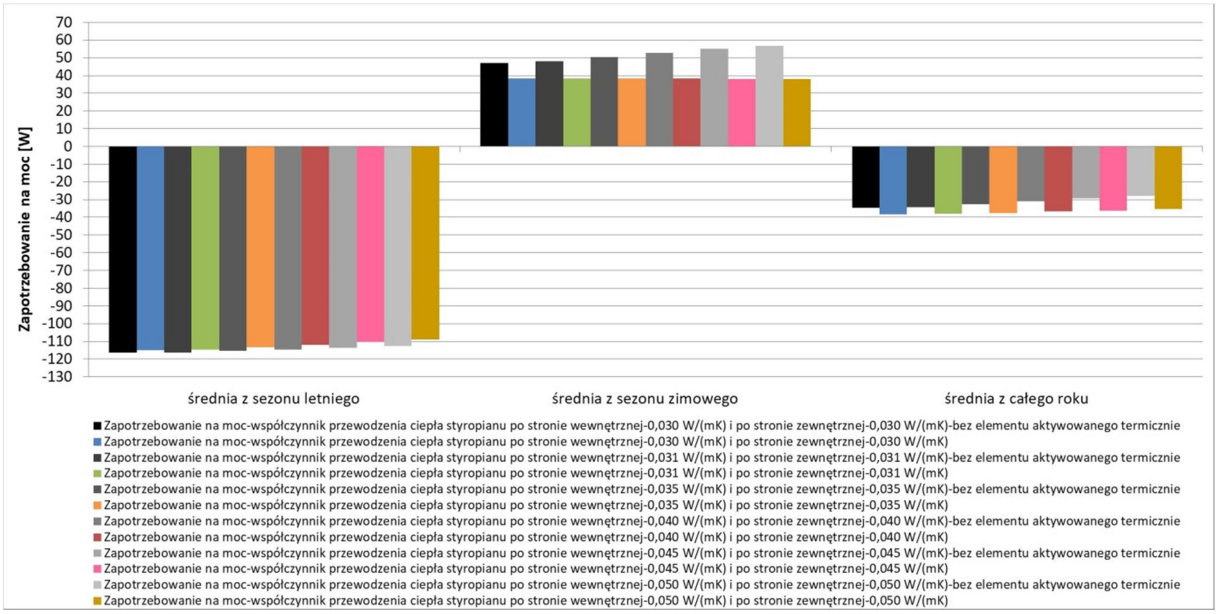
W kwestii przegrody z elementem aktywowanym termicznie dla średnich wartości zauważono rozbieżności w sezonie letnim i w całym roku (Rys. 7.46). Dla współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,030 W/(m·K) zanotowano odpowiednio -115 W i -38 W (maksimum w sezonie letnim i w całym roku), a dla współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,050 W/(m·K) -109 W i -36 W (minimum w sezonie letnim i w całym roku). W okresie zimowym zarejestrowano wartość 38 W dla ściany zewnętrznej z przewodami, natomiast dla rozwiązania bez nich wartość 47 W dla 0,030 W/(m·K) oraz 57 W dla 0,050 W/(m·K). W wyniku zbliżonych wartości w okresie letnim, średnia dla całego roku przekroczyła poziom wyznaczony przez wyniki dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie.



Rys. 7.44. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)



Rys. 7.45. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)

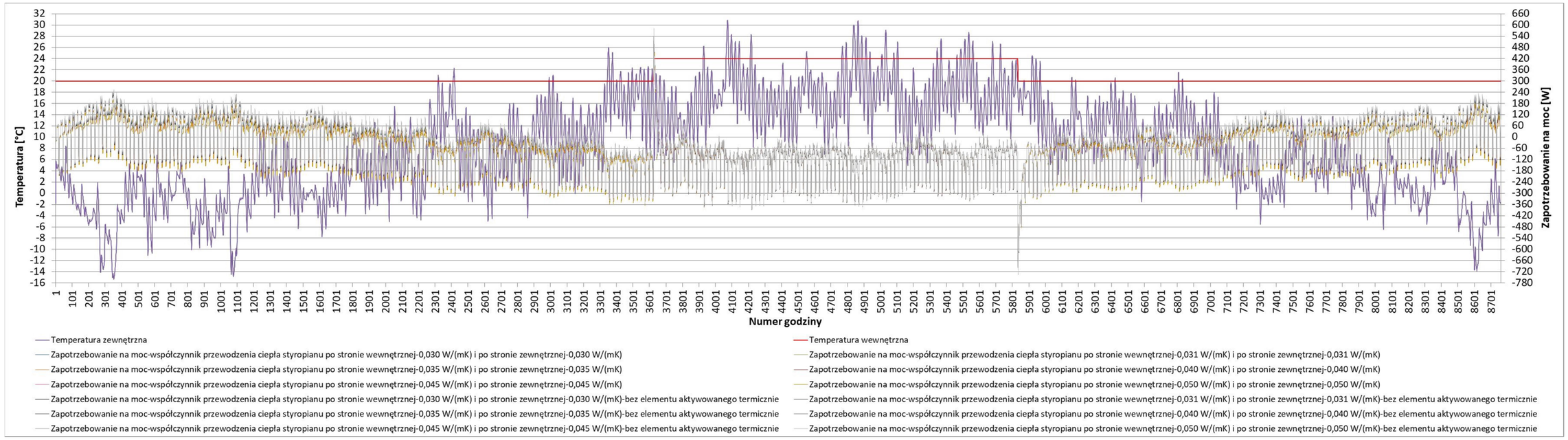


Rys. 7.46. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)

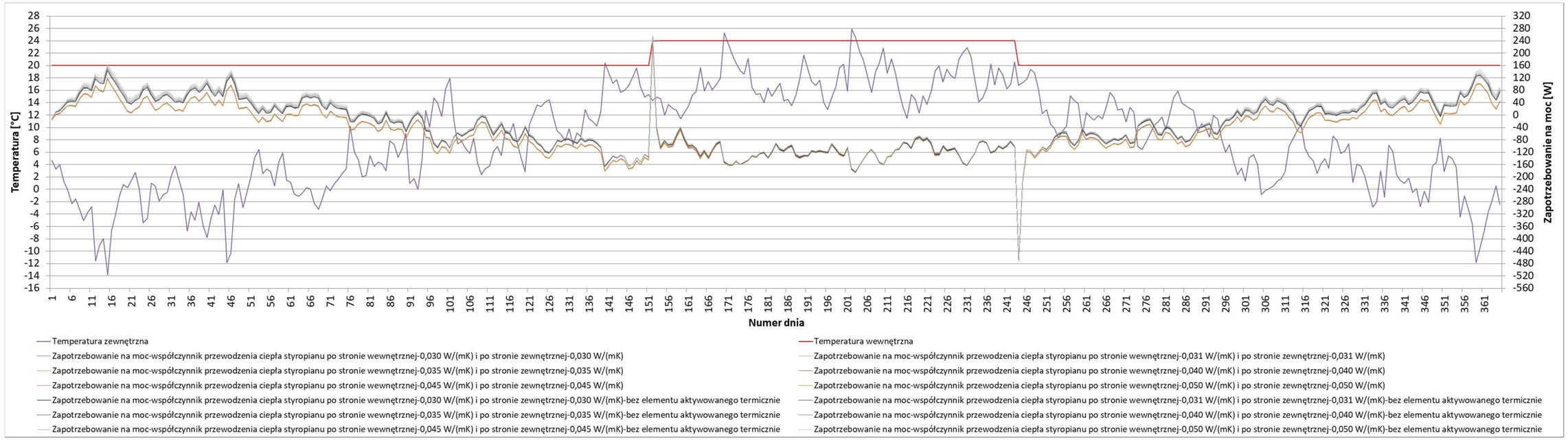
- Temperatura zasilania równa 22°C

W przypadku temperatury zasilania równej 22°C wartości godzinowe i dobowe prawie się na siebie nakładają (Rys. 7.47 i Rys. 7.48). Tym samym osiągają poziom od -388 W do 208 W (przebieg godzinowy – pomijając wartości skrajne: -726 W i 557 W) oraz od -186 W do 118 W (przebieg dobowy – bez wartości skrajnych: -473 W i 243 W). Porównując z wykresem sporządzonym dla rozwiązania bez elementu aktywowanego termicznie dla ściany bez przewodów osiągnięto wartość niższą dla dolnego zakresu przebiegu dobowego, czyli -184 W oraz dla dolnego przedziału przebiegu godzinowego taką samą wartość równą -388 W, podobnie jak dla skrajnej wartości w przebiegu dobowym równą -473 W.

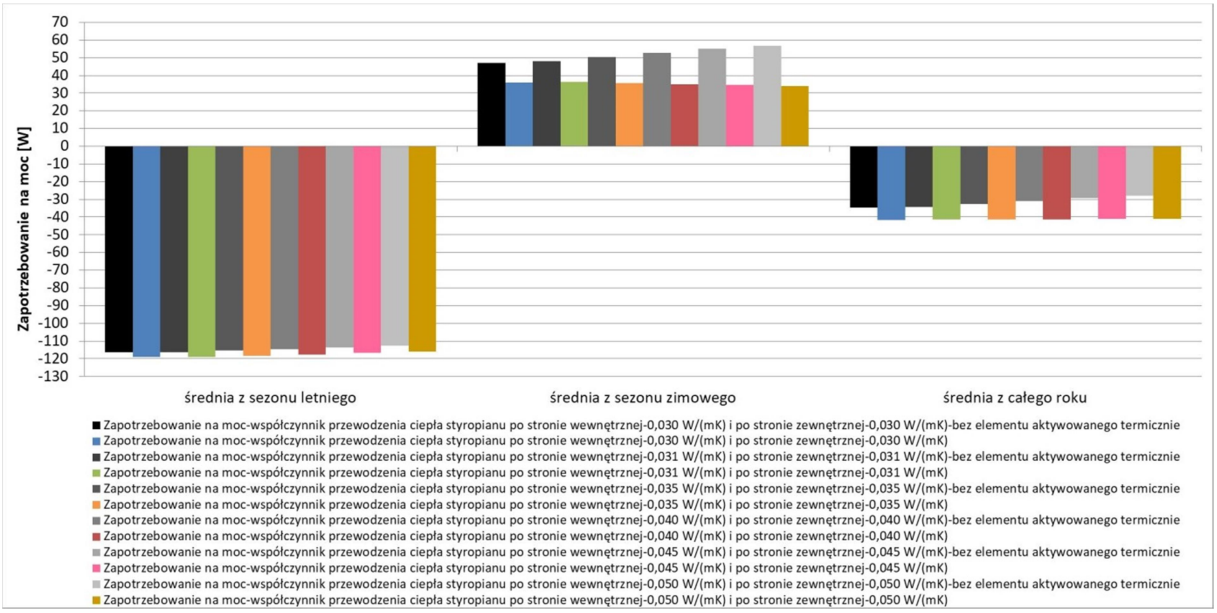
W przypadku ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie odnotowano podobne wartości średnie, dla których rozbieżności wynoszą od -116 W do -119 W dla sezonu letniego, w okresie zimowym z przedziału 34 W – 36 W, a dla całego roku od -41 W do -42 W (Rys. 7.49). Wartości minimalne odnoszą się do współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,050 W/(m·K), a maksymalne do wartości 0,030 W/(m·K). W sytuacji przegrody bez elementu aktywowanego termicznie osiągnięto wartości z zakresów: -116 W – -113 W (sezon letni), 47 W – 57 W (sezon zimowy) oraz -35 W – -28 W (średnia z całego roku). Podobnie najniższe wartości dotyczą współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,050 W/(m·K), a najwyższe wartości 0,030 W/(m·K).



Rys. 7.47. Godzinowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)



Rys. 7.48. Dobowe zapotrzebowanie na moc dla pomieszczenia nr 5 – pokoju w zależności od temperatury zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)



Rys. 7.49. Średnie zapotrzebowanie na moc dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)

7.2.5. Wnioski

W przypadku zmiennej temperatury zasilania, bez względu na jej wartość, średnie zapotrzebowanie na moc dla ściany zewnętrznej z przewodami osiągnęło wartości z zakresu: -119 W – -106 W (sezon letni), 36 W – 42 W (sezon zimowy) oraz -41 W – -32 W (dla całego roku). Taki sam przedział wartości zanotowano dla wariantów związanych z grubością betonu. W kwestii zmiennej grubości styropianu i jego współczynnika przewodzenia ciepła były to wartości od 34 W do 45 W dla sezonu zimowego oraz od -42 W do -25 W dla całego roku. Dla sezonu letniego zakres -120 W – -95 W dotyczył grubości styropianu, a przedział -119 W – -95 W odnosił się do współczynnika przewodzenia ciepła.

Dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie największe rozbieżności pomiędzy poszczególnymi wariantami wystąpiły dla modyfikacji opartej na zmianach temperatury zasilania. W ten sposób osiągnięto różnice równe: -13 W dla sezonu letniego, 6 W dla sezonu zimowego i -9 W dla całego roku pomiędzy temperaturą zasilania 16°C i 22°C. Przyrównując te wartości względem siebie stanowią one spadek o odpowiednio: 10,92% dla lata i 21,95% dla całego roku, natomiast dla zimy wzrost o 16,67%. Niezauważalne różnice zanotowano natomiast dla zmiennej grubości betonu, czyli bez względu na grubość betonu dla danej temperatury zasilania średnie zapotrzebowanie osiągało podobne wartości. Analizując natomiast wszystkie warianty razem w obrębie danej modyfikacji zauważono największe różnice pomiędzy temperaturą zasilania 16°C i 22°C dla grubości styropianu równej 8 cm. W przypadku średniego zapotrzebowania na moc można było osiągnąć różnice na poziomie -21 W dla sezonu letniego, 11 W dla sezonu zimowego i -16 W dla całego roku. Wartości te

stanowią wzrost o 32,35% dla sezonu zimowego i spadek o 18,10% dla lata oraz 39,02% dla całego roku. W kwestii zmiennej grubości betonu ponownie zanotowano najmniejsze różnice między danym wariantem a temperaturą zasilania 22°C, ściślej dla rozbieżności pomiędzy temperaturą zasilania 20°C i 22°C. Wartości te wyniosły odpowiednio dla lata, zimy i całego roku wielkości: -4 W (spadek o 3,36%), 2 W (wzrost o 5,56%), -3 W (spadek o 7,32%).

Dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie osiągnięto wartości wspomniane w niniejszym rozdziale. Dla ściany zewnętrznej wykonanej z 15 cm grubości betonu i docieplonej 13 cm warstwą styropianu po obu stronach uzyskano -116 W w sezonie letnim, 48 W w sezonie zimowym i -34 W dla całego roku. W kwestii zmiennej grubości betonu były to wartości z przedziału: -116 W – -115 (sezon letni), 46 W – 49 (sezon zimowy), -35 W – -34 W (dla całego roku). Wyniki dla różnych grubości styropianu zawierały się w zakresie: -117 W – -113 (sezon letni), 46 W – 57 (sezon zimowy), -36 W – -28 W (dla całego roku), a dla współczynnika przewodzenia ciepła styropianu były to wielkości: -116 W – -113 (sezon letni), 47 W – 57 (sezon zimowy), -35 W – -28 W (dla całego roku).

W przypadku zastosowania ściany zewnętrznej z przewodami największe oszczędności względem przegrody bez elementu aktywowanego termicznie osiągnięto dla sezonu letniego dla temperatury zasilania 16°C i grubości styropianu równej 8 cm na poziomie 18 W, a dla sezonu zimowego dla takiej samej grubości izolacji, ale temperatury zasilania równej 22°C na poziomie 23 W. Wartości te oznaczają spadek zapotrzebowania o 15,93% latem, 40,35% zimą. W sytuacji najmniejszych różnic między danym wariantem a rozwiązaniem bez elementu aktywowanego termicznie, zanotowano wartości -1 W dla sezonu letniego oraz -5 W dla sezonu zimowego. Pierwsza wielkość dotyczyła różnicy między wariantem z temperaturą zasilania 20°C i grubością izolacji 15 cm a wariantem bez przewodów (spadek o 0,85%), druga wielkość dla takiej samej grubości izolacji, ale temperatury zasilania równej 16°C (spadek o 10,87%).

8. Przegroda aktywowana termicznie a komfort cieplny

Program TRNSYS posłużył również do analizy komfortu cieplnego, który został zdefiniowany w TRNBuild. Wartość izolacyjna odzieży została przyjęta jako 1 clo (normalne ubranie robocze), a całkowite oddawane ciepło przez człowieka równe 1 met, czyli siedzenie w pozycji odprężonej [77].

8.1. Stosowane wskaźniki oceny komfortu cieplnego

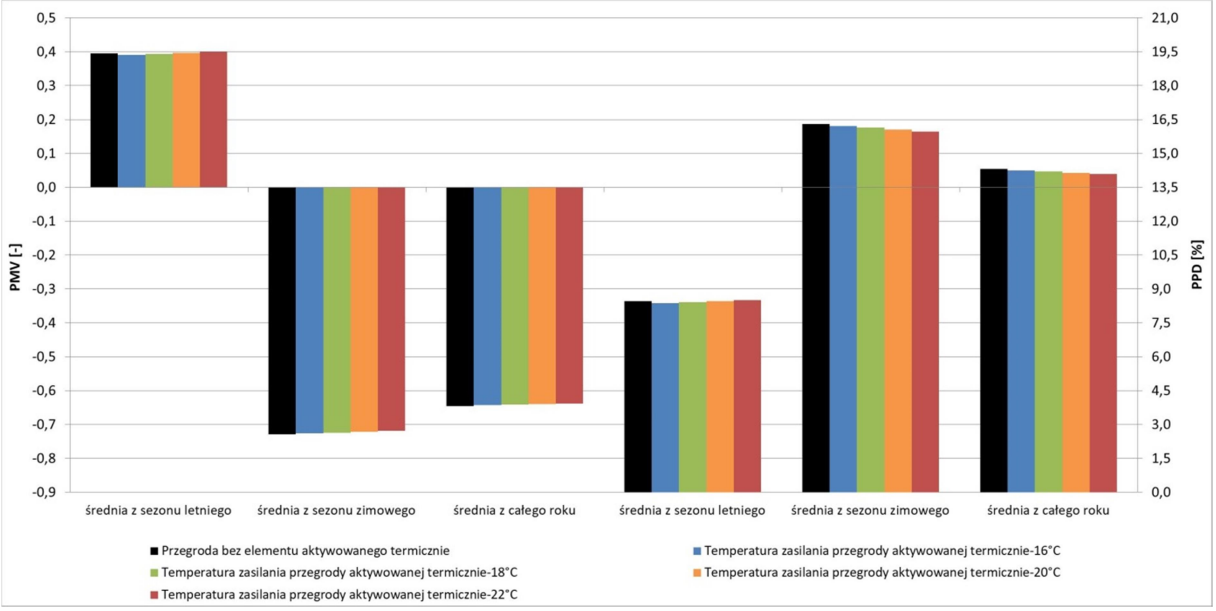
Do oceny komfortu cieplnego wykorzystano wskaźniki PMV (ocena odczucia) oraz PPD (przewidywany procent osób niezadowolonych) [77]. Odczucie można sprecyzować jako obojętne w przypadku wartości wskaźnika PMV równe 0 oraz PPD nie większe niż 5%. Dwa skrajne odczucia: gorąco i zimno odnoszą się do wartości wskaźnika PMV równe 3 i -3, a wskaźnika PPD większe równe 90%. Pozostałe wrażenia to: ciepło i chłodno (wskaźniki nie większe niż 2 i -2 dla PMV oraz 75% dla PPD), lekko ciepło i lekko chłodno (wskaźniki nie większe niż 1 i -1 dla PMV oraz 25% dla PPD).

8.2. Analizowane przypadki

Przestudiowano wpływ wartości temperatury zasilania elementu aktywowanego termicznie w ścianie zewnętrznej, grubości betonu, grubości styropianu oraz współczynnika przewodzenia ciepła styropianu. W przypadku temperatury zasilania przeanalizowano wartości: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C, dla grubość betonu: 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm oraz 30 cm o oporach cieplnych warstwy konstrukcyjnej równych: 0,04 m^2·K/W, 0,07 m^2·K/W, 0,09 m^2·K/W, 0,11 m^2·K/W i 0,13 m^2·K/W. Dla tych samych wartości temperatury zasilania przebadano ścianę zewnętrzną z warstwą betonu o grubości 15 cm docieploną styropianem o grubości: 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm oraz 15 cm o współczynniku przewodzenia ciepła równym 0,031 W/(m·K) wskutek tego osiągając opory cieplne warstwy izolacyjnej: 2,58 m^2·K/W, 3,23 m^2·K/W, 3,55 m^2·K/W, 3,87 m^2·K/W, 4,19 m^2·K/W, 4,52 m^2·K/W i 4,84 m^2·K/W. Ponownie dla ściany zewnętrznej o takiej samej grubości betonu, czyli 15 cm i w tym wypadku z 13 cm grubością warstwy styropianu z obu stron przegrody sprawdzono wskaźniki komfortu cieplnego dla współczynnika przewodzenia ciepła równego: 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K) dla poszczególnych wartości temperatury zasilania przegrody. Analizy dotyczyły zatem oporów cieplnych warstwy izolacyjnej wynoszących 2,60 m^2·K/W, 2,89 m^2·K/W, 3,25 m^2·K/W, 3,71 m^2·K/W, 4,19 m^2·K/W i 4,33 m^2·K/W. Dla każdego z wariantów zaprezentowano wyniki dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie, ponadto zilustrowano również sytuacje niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze. Uzyskane rezultaty przedstawiono dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla sezonu letniego, zimowego oraz całego roku. Krok czasowy w obliczeniach przyjęto jako 1 godzinę.

8.2.1. Komfort cieplny a temperatura zasilania elementu aktywowanego termicznie w ścianie zewnętrznej

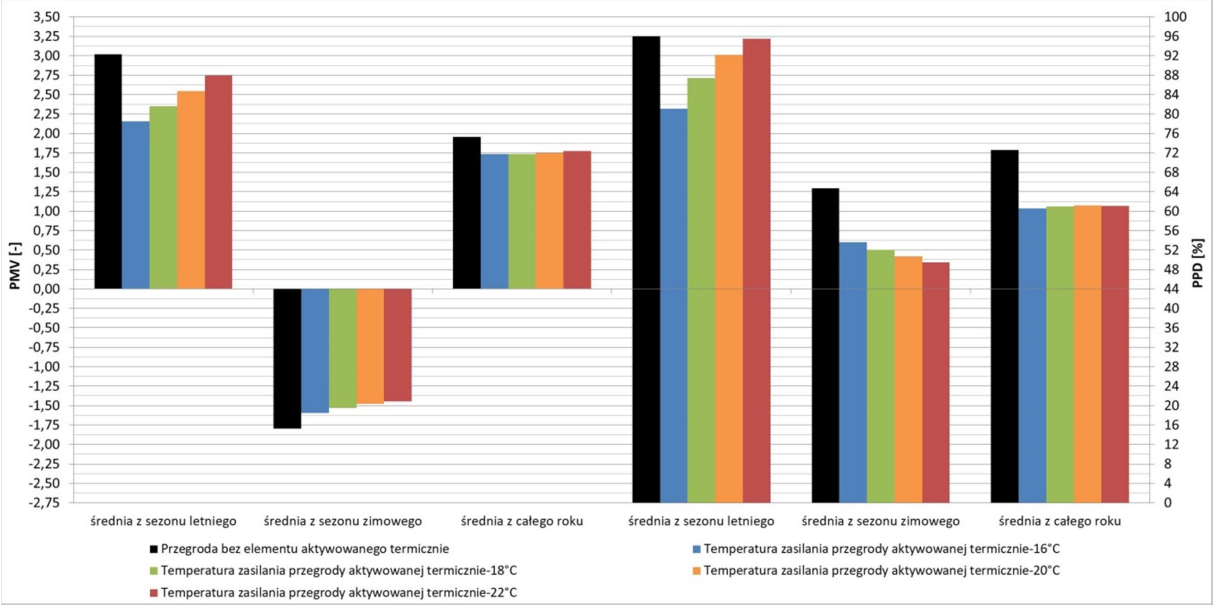
Na wykresie (Rys. 8.1) przedstawiono średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD wyznaczone dla poszczególnych sezonów oraz dla całego roku w zależności od temperatury zasilania elementu aktywowanego termicznie umieszczonego w ścianie zewnętrznej dla pomieszczenia nr 5 – pokoju oraz w przypadku braku elementu aktywowanego termicznie. Dla wszystkich wartości temperatury zasilania średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD osiągnęły zbliżone poziomy. W przypadku sezonu letniego wartość PMV nie przekroczyła 0,40, a wartość PPD 8,51%, czyli warunki można uznać za odpowiednie. Zimą natomiast PMV nie przekroczyła -0,73, a wartość PPD 16,22%, czyli warunki nadal pozostały odpowiednie, ponieważ wskaźniki nie przekraczają wartości -1 (PMV) oraz 25% (PPD) co świadczyłoby, że jest lekko chłodno. Średnia z całego roku osiągnęła wartości nie większe niż -0,64 (PMV) oraz 14,24% (PPD), ponownie warunki te są odpowiednie. W sytuacji przegrody bez elementu aktywowanego termicznie wskaźniki PMV pozostały zbliżone, tj. 0,40 (sezon letni), -0,73 (sezon zimowy) oraz -0,65 (cały rok). Różnicę można jednak zauważyć dla wskaźników PPD, które osiągnęły wartości 8,46% (lato), 16,30% (zima) i 14,32% (cały rok).



Rys. 8.1. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz w zależności od temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C, 18°C, 20°C i 22°C

Poniższy wykres (Rys. 8.2) przedstawia wartości wskaźników PMV oraz PPD w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze. Wynika z niego, że pod względem wartości temperatury zasilania przewodów w przegrodzie najniższy wskaźnik PPD i PMV w sezonie letnim dotyczy temperatury zasilania równej 16°C i osiąga

poziom 81,11% oraz 2,15, co świadczy o odczuciu ciepła, natomiast najwyższy 22°C, czyli 95,50% (PPD) i 2,74 (PMV), czyli sytuacja pomiędzy ciepło a gorąco. Sezon zimowy oraz średnia dla całego roku charakteryzowała się zbliżonymi wartościami co do temperatury zasilania. Wartości PPD oraz PMV mieściły się w przedziałach: 49,46% – 53,60% i -1,59 – -1,45 (odczucie między chłodno a lekko chłodno) dla sezonu zimowego, a dla całego roku od 60,54% do 61,17% (PPD) i od 1,74 do 1,77 (PMV) – lekko ciepło a ciepło. Bez względu na wartość temperatury zasilania zanotowano wartości niższe niż dla przegrody bez modyfikacji, czyli dla sezonu letniego: 96,01% (PPD) i 3,02 (PMV) – gorąco, dla sezonu zimowego: 64,75% (PPD) i -1,79 (PMV) – między lekko chłodno a chłodno oraz średnia dla całego roku: 72,62% (PPD) i 1,95 (PMV) – ciepło.



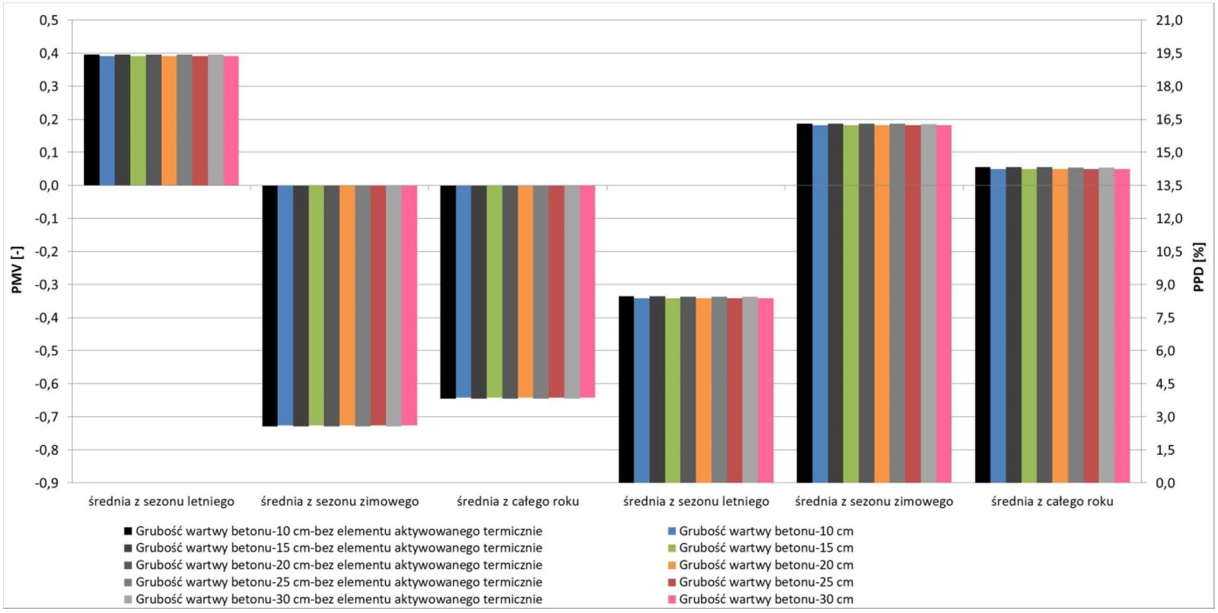
Rys. 8.2. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz w zależności od temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C, 18°C, 20°C i 22°C w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

8.2.2. Komfort cieplny a grubość betonu

Pod względem komfortu cieplnego oceniono grubości betonu: 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm oraz 30 cm zestawiając wyniki wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla temperatury zasilania równej 16°C, 18°C, 20°C i 22°C przegrody (ściany zewnętrznej) zaizolowanej z obu stron styropianem o grubości 13 cm o współczynniku przewodzenia ciepła równym 0,031 W/(m·K) pomieszczenia nr 5 – pokoju. Przestawiono również rezultaty dla przegrody bez modyfikacji.

- Temperatura zasilania równa 16°C

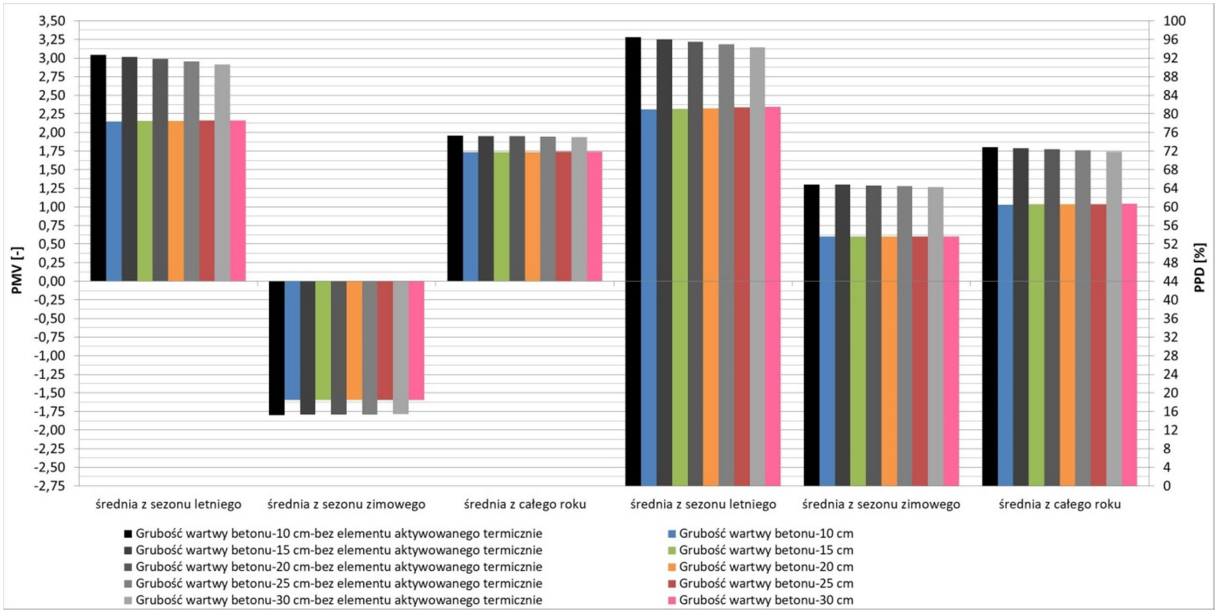
Wskaźniki PMV podczas zasilania pętli wodą o temperaturze 16°C osiągnęły średnie wartości 0,39 dla sezonu letniego, -0,73 dla okresu zimowego i -0,64 dla całego roku (Rys. 8.3). W przypadku współczynnika PPD średnie wartości wyniosły 8,37% (sezon letni), 16,22% (sezon zimowy) oraz 14,24% (cały rok). Takie same wartości osiągnięto dla wszystkich przeanalizowanych grubości betonu. Wszystkie te parametry wskazują na warunki komfortowe. Podobnie jak dla rozwiązania bez przewodów, dla którego zanotowano wartości: dla sezonu letniego 0,40 (PMV) i 8,46% (PPD), dla sezonu zimowego -0,73 (PMV) i 16,30% (PPD) oraz dla całego roku -0,65 (PMV) i 14,33% (PPD).



Rys. 8.3. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm

W sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze wskaźniki PMV i PPD uzyskały zbliżone wartości bez względu na grubość betonu przegrody z elementem aktywowanym termicznie (Rys. 8.4). Dla sezonu letniego były to wartości z przedziału: 2,15 – 2,16 (PMV) i 80,98% – 81,46% (PPD), dla sezonu zimowego -1,60 – -1,59 (PMV) i 53,59% – 53,65% (PPD), a dla całego roku 1,73 – 1,74 (PMV) i 60,49% – 60,66% (PPD). Najwyższe wartości PPD odnoszą się do 30 cm grubości betonu, a najniższe do 10 cm warstwy. W kwestii wskaźników PMV to odczucie w każdym z okresów można zdefiniować jako: w sezonie letnim ciepło, w sezonie zimowym pomiędzy chłodno a lekko chłodno, a średnio w całym roku między lekko ciepło a ciepło. Dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie odczucie uległo pogorszeniu: w sezonie letnim gorąco – PMV na poziomie od 2,92 do 3,04, w sezonie zimowym pomiędzy chłodno a lekko chłodno PMV równe od -1,80 do -1,79, a dla całego roku ciepło PMV wynoszące od 1,94 do 1,96.

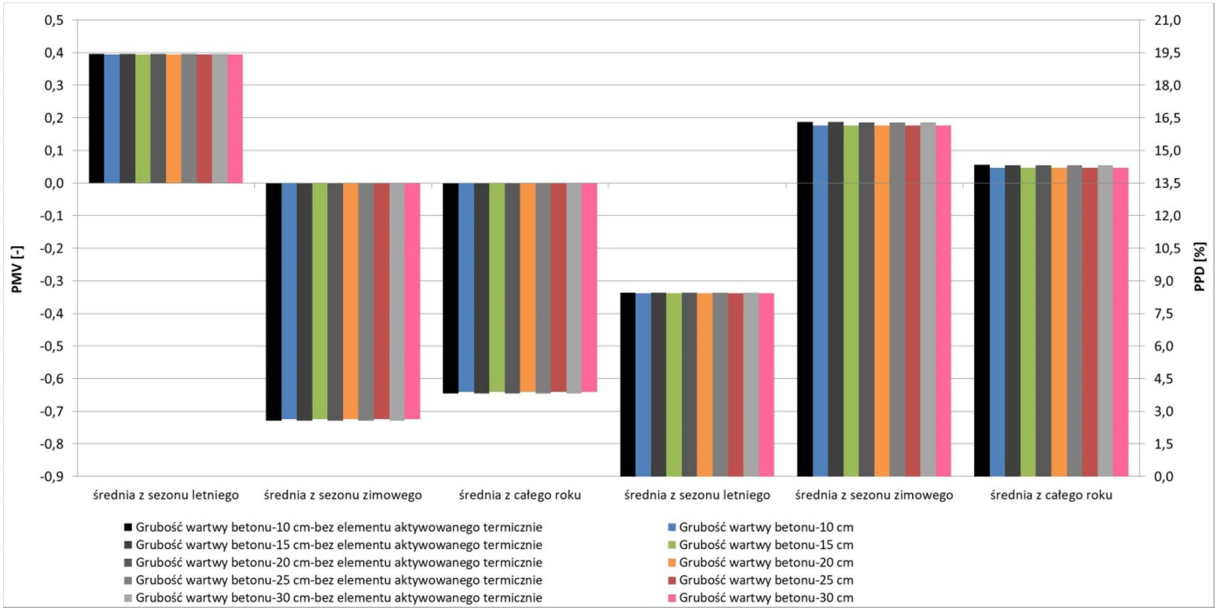
W przypadku wskaźnika PPD zanotowano wartości z zakresu: 94,36% – 96,47% (sezon letni), 64,28% – 64,85% (sezon zimowy) oraz 71,86% – 72,81% (dla całego roku).



Rys. 8.4. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

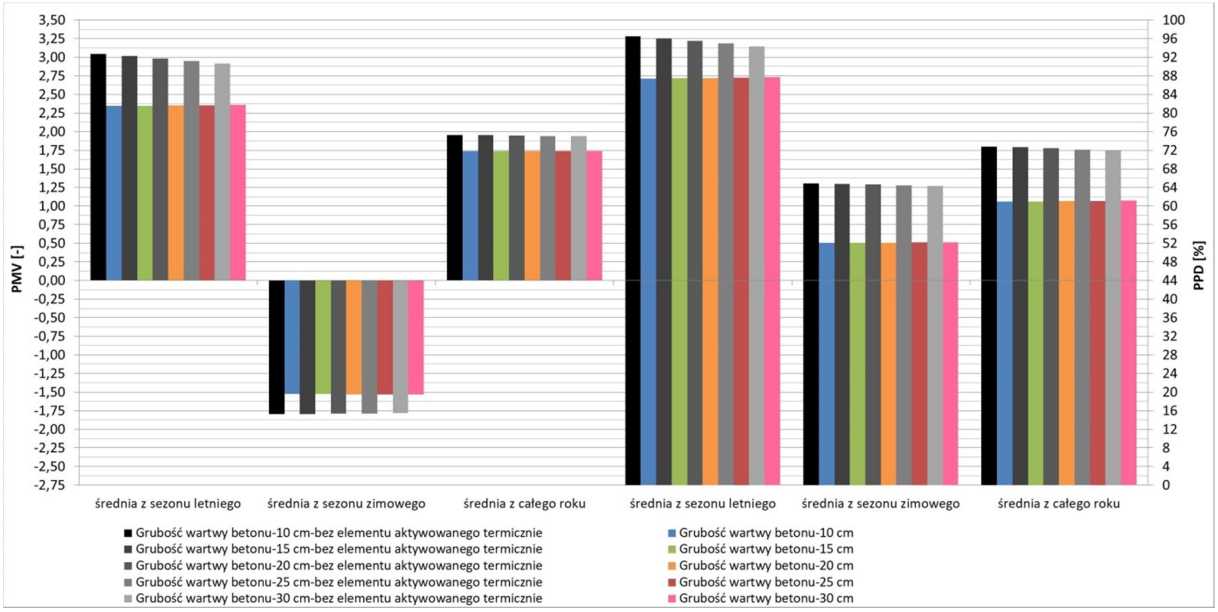
- Temperatura zasilania równa 18°C

W kwestii wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla temperatury zasilania równej 18°C przegrody aktywowanej termicznie dla pomieszczenia nr 5 – pokoju (Rys. 8.5) ponownie osiągnięto zbliżone wartości bez względu na grubość betonu: 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm oraz 30 cm. W sezonie letnim wskaźnik PMV wyniósł 0,39, a PPD 8,42%, dla sezonu zimowego były to wartości -0,72 (PMV) oraz 16,14% (PPD), dla całego roku -0,64 (PMV) i 14,19% (PPD). Wartości te są niższe od wspomnianych wcześniej wartości wyznaczonych dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie, czyli dla sezonu letniego 0,40 (PMV) i 8,46% (PPD), dla sezonu zimowego -0,73 (PMV) i 16,30% (PPD) oraz dla całego roku -0,65 (PMV) i 14,33% (PPD).



Rys. 8.5. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm

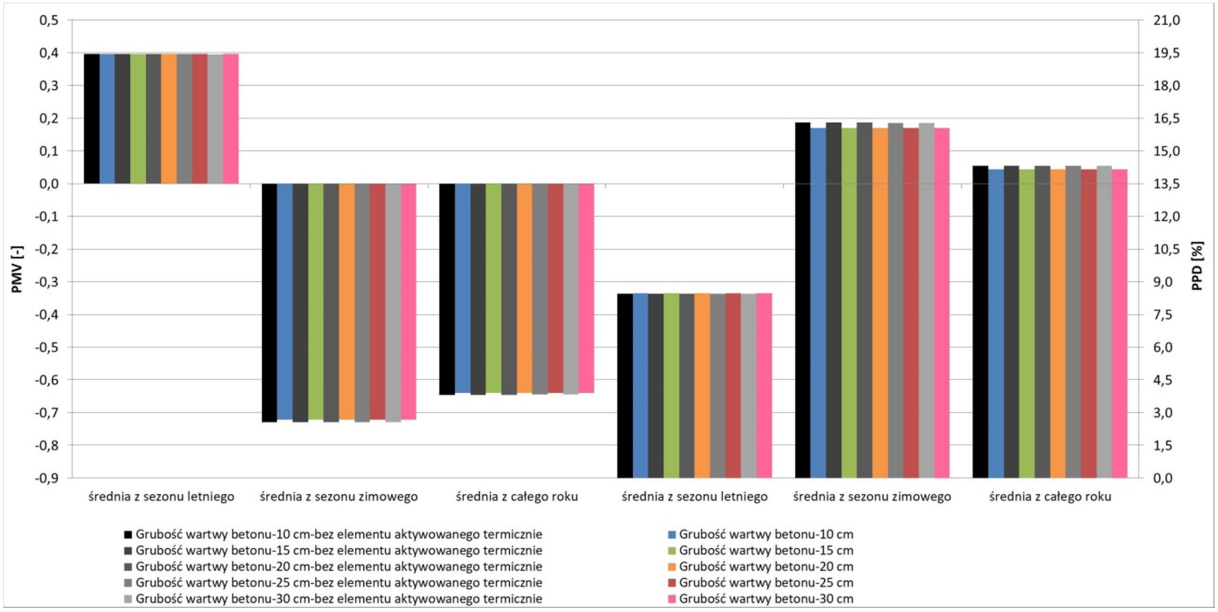
Rezultaty dla wskaźników PMV oraz PPD w sytuacji, kiedy nie dostarcza się energii cieplnej i chłodniczej, przedstawiono na poniższym wykresie (Rys. 8.6). W sezonie letnim osiągnięto wartości: od 2,35 do 2,36 (PMV) i od 87,36% do 87,70%, w sezonie zimowym równe -1,53 (PMV) i 52,08% – 52,18% (PPD), a dla całego roku od 1,73 do 1,74 i od 60,97% do 61,13%. Wskaźniki PMV zinterpretowano w następujące sposób: pomiędzy ciepło a gorąco (lato), między lekko chłodno a chłodno (zima), a dla całego roku między lekko ciepło a ciepło. Opisane wcześniej wskaźniki dla ściany zewnętrznej bez przewodów nadal pozostają wyższe.



Rys. 8.6. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

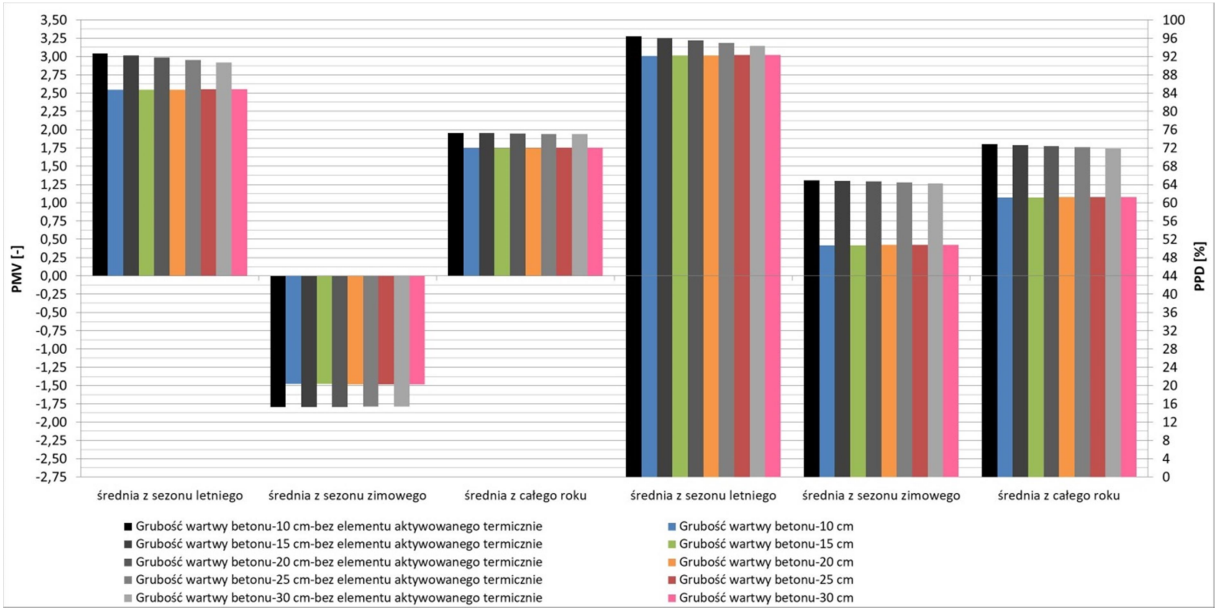
- Temperatura zasilania równa 20°C

Dla temperatury zasilania równej 20°C średnia wartość wskaźnika PMV dla sezonu letniego wyniosła 0,40, w okresie zimowym -0,72, a dla całego roku -0,64 dla wszystkich analizowanych grubości betonu (Rys. 8.7). Wskaźnik PPD wyniósł wówczas 8,46% (sezon letni), 16,06% (sezon zimowy), 14,14% (cały rok). W sezonie letnim osiągnięto takie same wartości w przypadku przegrody bez elementu aktywowanego termicznie. Pozostałe 2 okresy: zima i cały rok charakteryzowały się wartościami: -0,73 (PMV) i 16,30% (PPD) oraz -0,65 (PMV) i 14,33% (PPD).



Rys. 8.7. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm

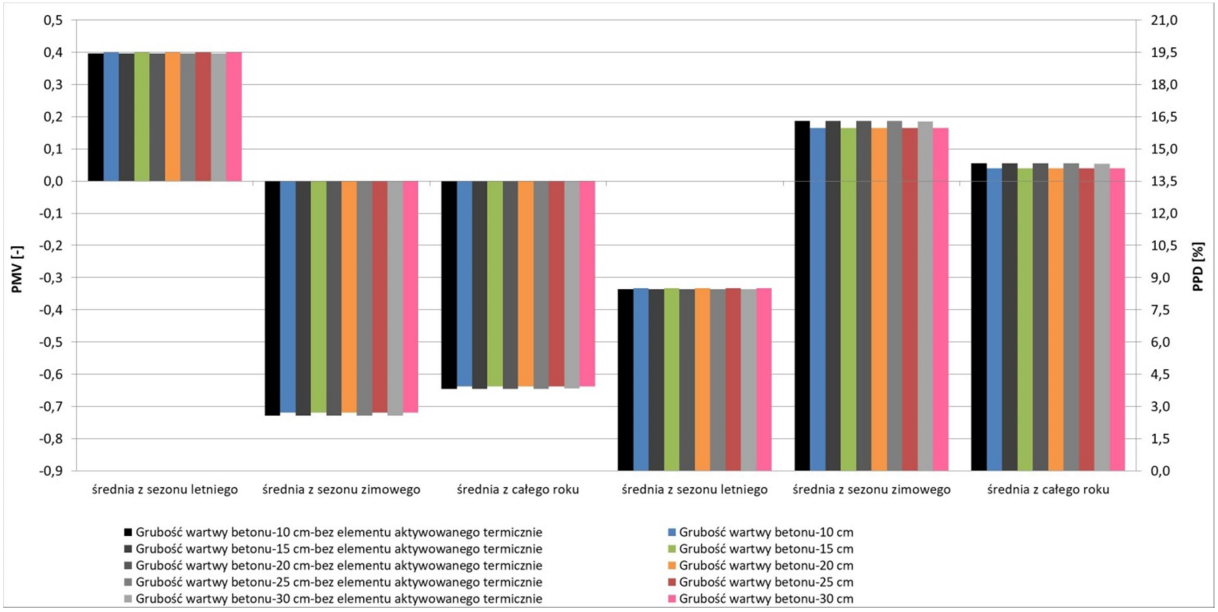
W przypadku niepokrytego zapotrzebowania na cele chłodnicze dla temperatury zasilania równej 20°C wskaźnik PPD osiągnął wartość od 92,15% do 92,36%, a PMV w zakresie 2,54 – 2,55 w sezonie letnim (Rys. 8.8), czyli zbliżył się do odczucia gorąco. W sezonie zimowym zanotowano wartości: -1,48 (PMV) i 50,68% – 50,82% (PPD), a dla całego roku 1,75 (PMV) i 61,13% – 61,29% (PPD), czyli odczucie zimą było na poziomie lekko chłodno a chłodno, a średnio dla całego roku pomiędzy lekko ciepło a ciepło. Odnośnie przegrody bez elementu aktywowanego termicznie to wskaźniki PMV oraz PPD pozostają wyższe.



Rys. 8.8. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

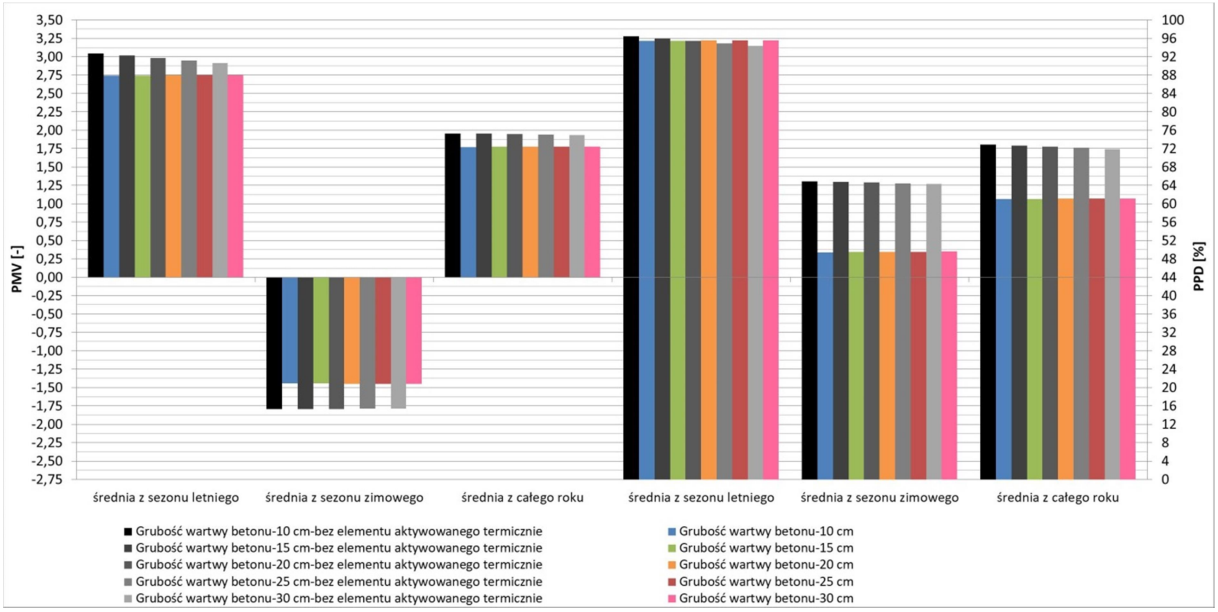
- Temperatura zasilania równa 22°C

Wskaźnik PPD dla temperatury zasilania równej 22°C osiągnął w okresie całego roku średnią wartość na poziomie 14,09%, dzieląc na okresy uzyskano wartości 8,51% (lato), 15,98% (zima) (Rys. 8.9). Wskaźnik PMV uzyskał wówczas 0,40 (lato), -0,72 (zima) i -0,64 (cały rok). W sezonie letnim wskaźnik PPD dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie był niższy i wyniósł 8,46%, wówczas wskaźnik PMV był równy 0,4. Dla zimy osiągnięto wartości -0,73 (PMV) i 16,30%, a dla całego roku -0,65 (PMV) i 14,33% (PPD).



Rys. 8.9. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm

W sezonie letnim dla sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele chłodnicze wskaźnik PPD pozostał niższy od rezultatu dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie jedynie dla 2 wariantów grubości betonu: 10 cm (95,47%) i 15 cm (95,49%) (Rys. 8.10). W przypadku sezonu zimowego dla ściany zewnętrznej z przewodami otrzymano wyniki w zakresie 49,42% – 49,58% (PPD) oraz -1,45 (PMV), a dla całego roku wskaźniki: PPD i PMV na poziomie od 61,02% do 61,17% oraz 1,77 – 1,78. W kwestii odczucia sezon letni charakteryzował się odczuciem gorąco, zimą między lekko chłodno a chłodno, natomiast dla całego roku między lekko ciepło a ciepło. Odnośnie ściany zewnętrznej bez przewodów otrzymano wskaźniki równe: 2,92 – 3,04 (PMV) i 94,36% – 96,47% (PPD) dla sezonu letniego, dla sezonu zimowego -1,80 – -1,79 (PMV) i 64,28% – 64,85% (PPD), a dla całego roku wskaźnik PMV w zakresie 1,94 – 1,96 i PPD wynoszące od 71,86% do 72,81%.



Rys. 8.10. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od grubości betonu 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

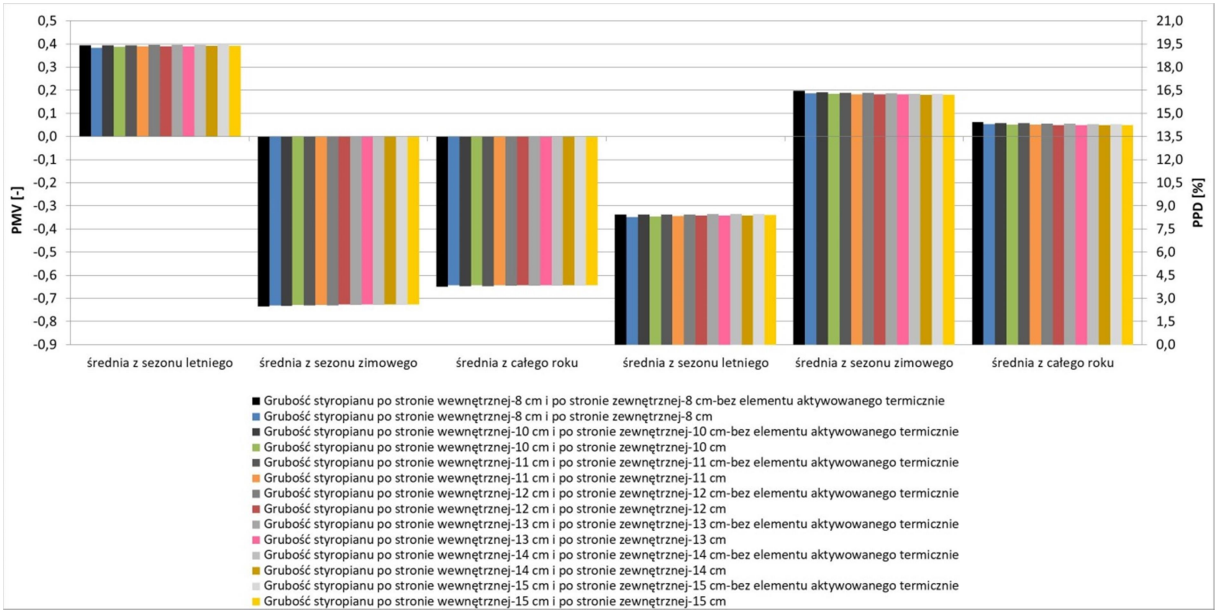
8.2.3. Komfort cieplny a grubość styropianu

Wskaźniki komfortu cieplnego PMV oraz PPD wyznaczono dla różnych wariantów grubości styropianu: 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm oraz 15 cm o współczynniku przewodzenia ciepła równym 0,031 W/(m·K) zamontowanej na ścianie zewnętrznej wykonanej z 15 cm warstwy betonu. Wyniki przedstawiono dla pomieszczenia nr 5 – pokoju wraz z rezultatami dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie.

- Temperatura zasilania równa 16°C

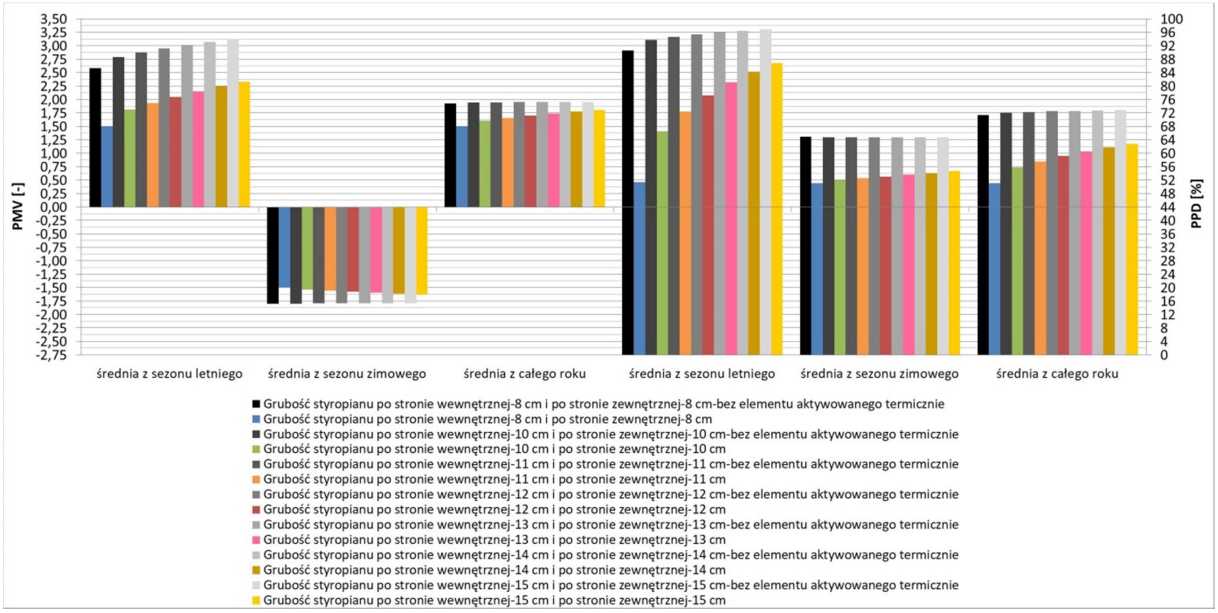
Średnia wartość dla wskaźnika PMV wyniosła od 0,38 do 0,39 dla sezonu letniego, w sezonie zimowym -0,73, a dla całego roku osiągnęła wartość -0,64 (Rys. 8.11) dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie. W przypadku wskaźnika PPD średnie wartości wyniosły: od 8,26% do 8,40% dla sezonu letniego, od 16,20% do 16,32% dla sezonu zimowego oraz od 14,23% do 14,29% dla całego roku. Najwyższe wartości dla sezonu zimowego i całego roku dotyczą 8 cm grubości styropianu, a najniższe dla 15 cm izolacji. Dla sezonu letniego sytuacja była odwrotna: dla 8 cm – minimum, dla 15 cm – maksimum. Identyczna sytuacja latem wystąpiła dla ściany zewnętrznej bez modyfikacji: najniższe wartości odnosiły się do 8 cm grubości styropianu: 0,39 (PMV) i 8,42% (PPD), a najwyższe dla 15 cm: 0,40 (PMV) i 8,46% (PPD). W sezonie zimowym zachowując tendencję maksymalne wartości odnosiły się do 8 cm grubości styropianu: -0,74 (PMV) i 16,46% (PPD), a minimalne dla 15 cm: -0,73 (PMV) i 16,26% (PPD). Średnia z całego roku

dla wskaźnika PMV osiągnęła poziom -0,65, natomiast w przypadku wskaźnika PPD były to wartości od 14,30% (dla 15 cm) do 14,44% (dla 8 cm).



Rys. 8.11. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm

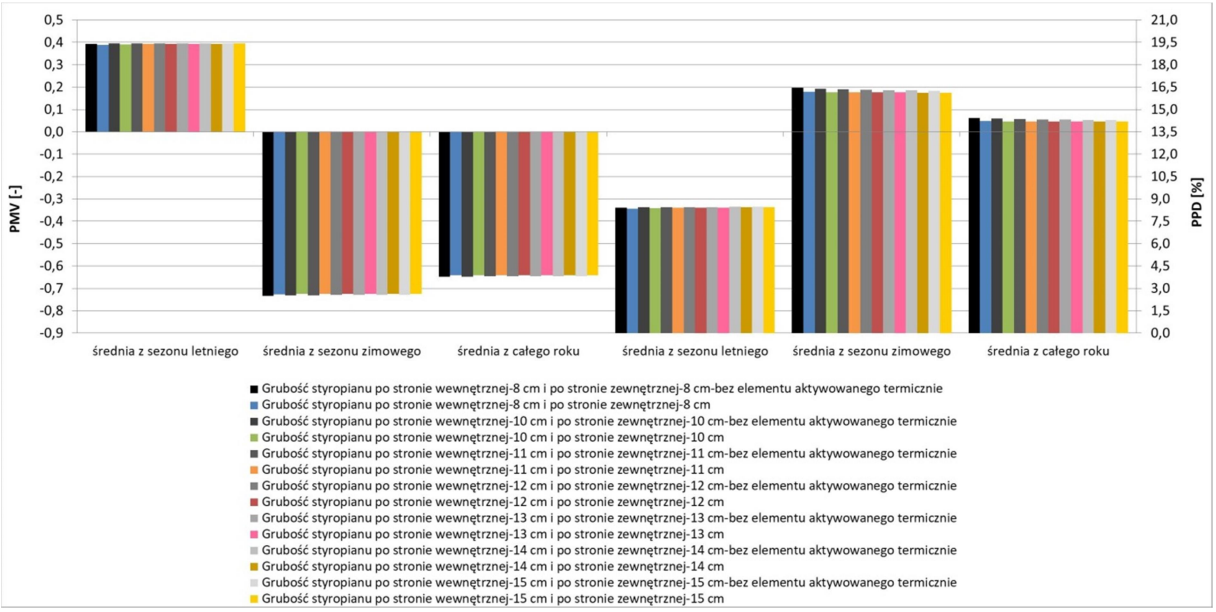
W sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze dla temperatury zasilania równej 16°C wskaźnik PPD wyniósł latem: od 51,40% do 86,79%, a PMV w zakresie 1,51 (odczucie między lekko ciepło a ciepło) – 2,33 (odczucie między ciepło a gorąco) (Rys. 8.12). Najniższe wartości dotyczą 8 cm grubości styropianu, a najwyższe 15 cm grubości warstwy izolacji. Tendencja ta jest utrzymana dla pozostałych okresów: w sezonie zimowym były to wartości 51,01% – 54,62% (PMV na poziomie -1,63 – -1,50 – odczucie między chłodno a lekko chłodno), a dla całego roku 51,12% – 62,73% (PMV w przedziale 1,50 – 1,81 – odczucie między lekko ciepło a ciepło). W przypadku przegrody bez elementu aktywowanego termicznie osiągnięto wartości dla sezonu letniego od 90,50% do 96,83% w przypadku PPD i od 2,58 (wrażenie między ciepło a gorąco) do 3,12 (wrażenie gorąco) dla PMV. Wartość najwyższa dotyczyła 15 cm grubości styropianu, a najniższa dla 8 cm, podobnie jak dla całego roku, gdy osiągnięto wskaźnik PPD w zakresie 71,40% – 72,84% (PMV na poziomie 1,93 – 1,96 – wrażenie ciepło). Dla sezonu zimowego PMV wyniosło -1,80 – wrażenie między lekko chłodno a chłodno, a PPD od 64,76% (dla15 cm) do 64,96% (dla 8 cm).



Rys. 8.12. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

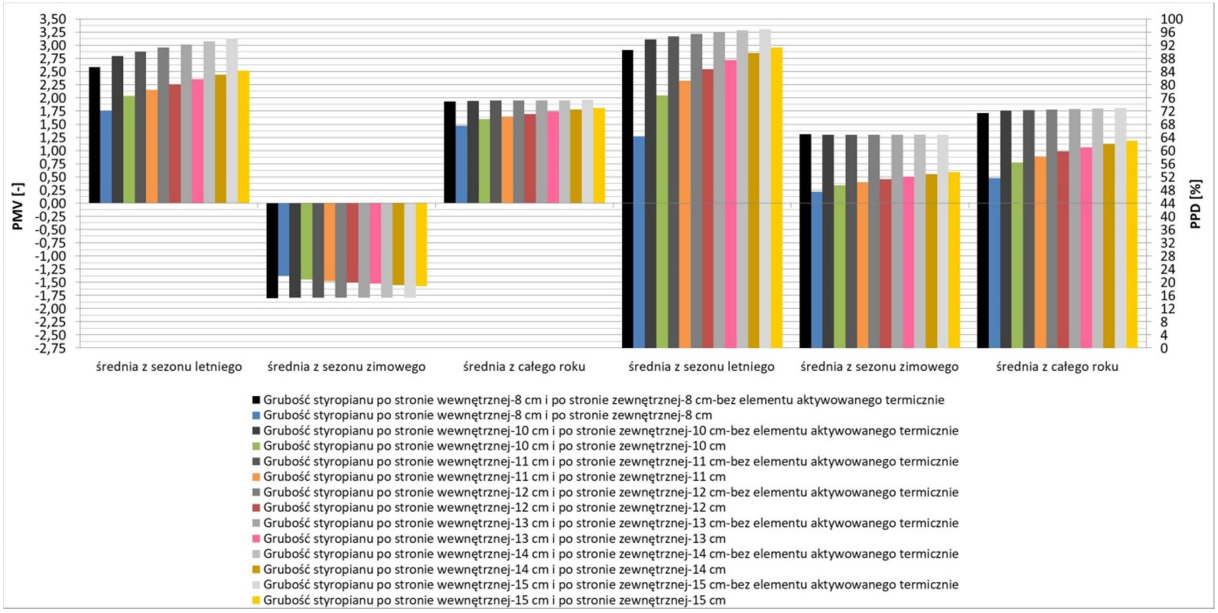
- Temperatura zasilania równa 18°C

Charakteryzując ścianę zewnętrzną z przewodami najniższy procent osób niezadowolonych (PPD) równy 8,34% oraz wskaźnik PMV na poziomie 0,39 dla średniej z sezonu letniego zaobserwowano dla 8 cm warstwy styropianu. W przypadku sezonu zimowego najniższa wartość PMV wyniosła -0,72 dla grubości styropianu: 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm, natomiast wartość PPD dla grubości styropianu: 14 cm i 15 cm wyniosła 16,13%. Dla średniej z całego roku wartość PMV osiągnęła poziom -0,64, a minimalna dla wskaźnika PPD równa 14,19% dla grubości styropianu: 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm. W przypadku przegrody bez elementu aktywowanego termicznie osiągnięto wartości z zakresu 0,39 – 0,40 (PMV) i 8,42% – 8,46% (PPD) dla sezonu letniego, dla okresu zimowego od -0,74 do -0,73 (PMV) i od 16,26% do 16,46%, natomiast dla całego roku wskaźnik PMV równy -0,65, a wskaźnik PPD w przedziale 14,30% – 14,44%.



Rys. 8.13. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm

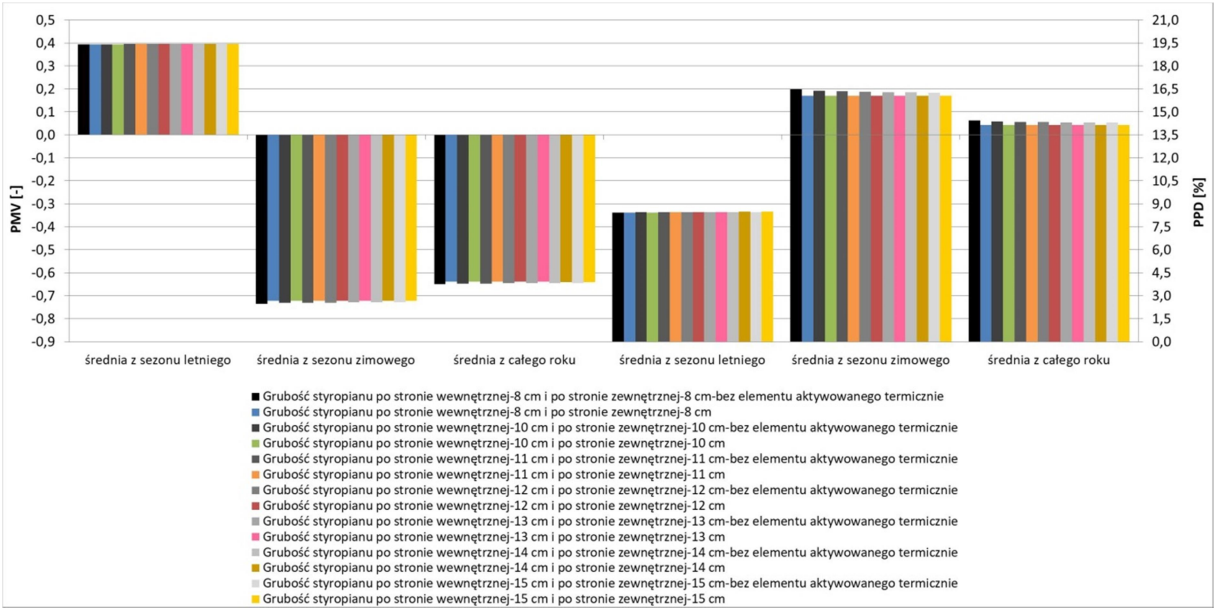
Niepokryte zapotrzebowanie na cele grzewcze i chłodnicze spowodowało wzrost wskaźników PPD oraz PMV (Rys. 8.14). Największe wartości dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie osiągnięto w sezonie letnim dla 15 cm grubości styropianu i były to wielkości: 91,32% (PPD) oraz 2,51 (PMV), czyli odczucie między ciepło a gorąco. Dolny zakres dla tej pory wystąpił dla 8 cm izolacji i wyniósł: 64,29% (PPD) oraz 1,76 (PMV), czyli wrażenie między lekko ciepło a ciepło. Pozostałe sezony były bardziej wyrównane względem siebie. W sezonie zimowy osiągnięto wartości z zakresu 47,43% – 53,49% (PPD) i -1,57 – -1,38 (PMV) – odczucie między chłodno a lekko chłodno, a dla całego roku 51,68% – 63,02% (PPD) i 1,47 – 1,81 (PMV), czyli wrażenie między lekko ciepło a ciepło. W odniesieniu do ściany zewnętrznej bez przewodów wartości wskaźników były wyższe i wynosiły: 90,50% – 96,83% (PPD) i 2,58 – 3,12 (PMV) dla sezonu letniego, 64,76% – 64,96% (PPD) i -1,80 (PMV) dla sezonu zimowego, a dla całego roku od 71,40% do 72,84% (PPD) i od 1,93 do 1,96 (PMV). Pod względem odczucia poszczególne sezony charakteryzowały się wrażeniem: między ciepło a gorąco a gorąco w sezonie letnim, między lekko chłodno a chłodno w sezonie zimowym oraz ciepło dla całego roku.



Rys. 8.14. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

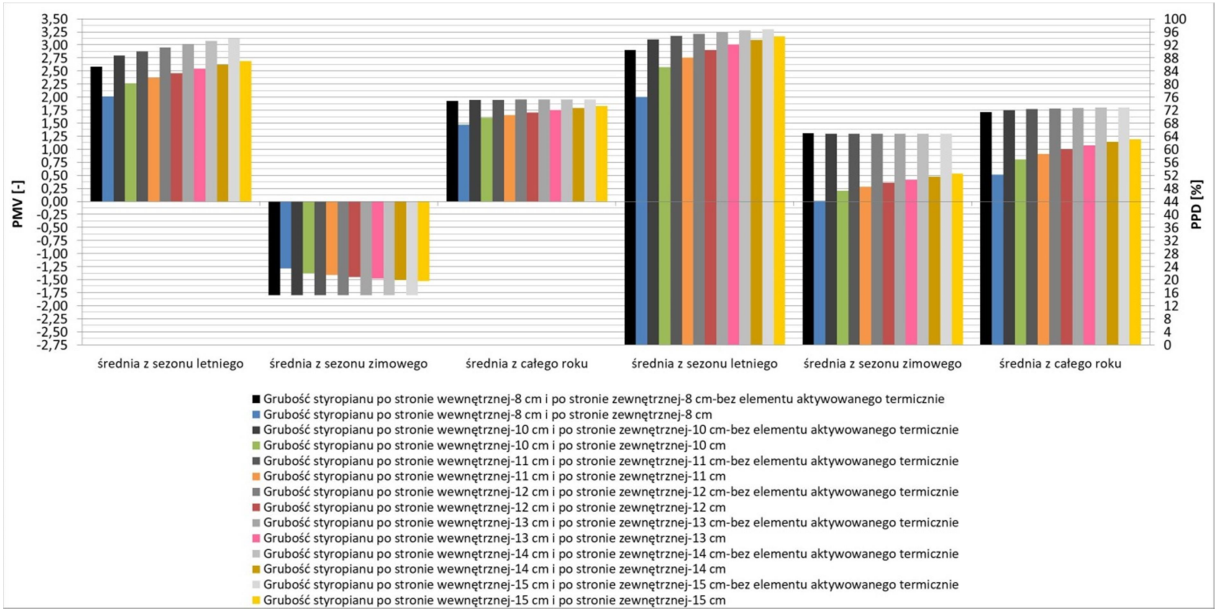
- Temperatura zasilania równa 20°C

Dla temperatury zasilania równej 20°C i grubości izolacji równej 8 cm z obu stron otrzymano średnią wartość wskaźników: w sezonie letnim 8,41% (PPD) oraz 0,39 (PMV), w sezonie zimowym 16,06% (PPD) i -0,72 (PMV), dla całego roku 14,13% (PPD) oraz -0,64 (PMV) (Rys. 8.15). W sytuacji 15 cm izolacji otrzymano wyniki: PMV równy 0,40 (sezon letni), -0,72 (sezon zimowy) oraz -0,64 (dla całego roku), a PPD na poziomie 8,48% (sezon letni), 16,06% (sezon zimowy) oraz 14,15% (dla całego roku). W przypadku przegrody bez elementu aktywowanego termicznie zanotowano wartości równe: 0,39 (PMV) i 8,42% (PPD) w sezonie letnim, -0,74 (PMV) i 16,46% (PPD) w sezonie zimowym oraz -0,65 (PMV) i 14,44% (PPD) dla całego roku dla 8 cm grubości izolacji. W sytuacji 15 cm grubości izolacji wskaźniki PMV wyniosły: 0,4 (sezon letni), -0,73 (sezon zimowy) oraz -0,65 (dla całego roku), wskaźniki PPD równe: 8,46% (lato), 16,26% (zima) oraz 14,30% (cały rok).



Rys. 8.15. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm

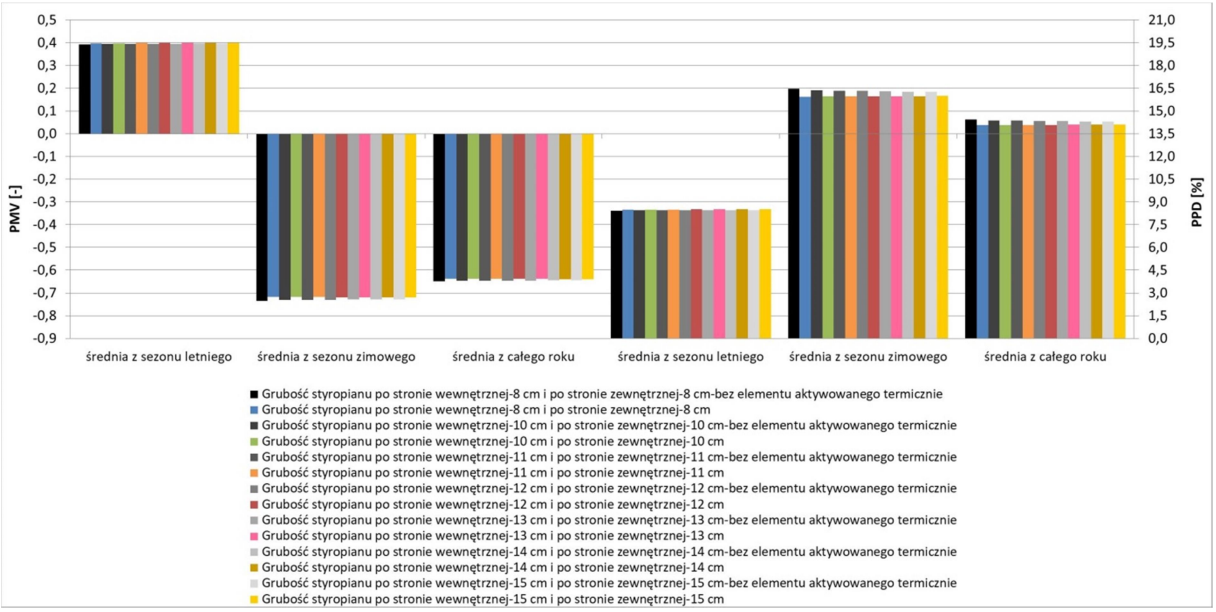
W przypadku przegrody z elementem aktywowanym termicznie i przy jednoczesnym braku dostarczenia energii cieplnej i chłodniczej zanotowano wartości PPD równe: od 76,05% do 94,61% w sezonie letnim, w sezonie zimowym od 44,19% do 52,44% , a dla całego roku od 55,22% do 63,07% (Rys. 8.16). Wartości maksymalne dotyczyły 8 cm grubości styropianu, a minimalne dla 15 cm izolacji. Odnośnie wskaźnika PMV wyniósł: 2,01 – 2,69 (lato) – odczucie między ciepło a gorąco, -1,53 – -1,29 (zima) – między chłodno a lekko chłodno, a średnio dla całego roku 1,47 – 1,83 – między lekko ciepło a ciepło. W porównaniu z ścianą zewnętrzną bez przewodów wartości wskaźników PPD oraz PMV nadal pozostają wyższe dla rozwiązania bez modyfikacji.



Rys. 8.16. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

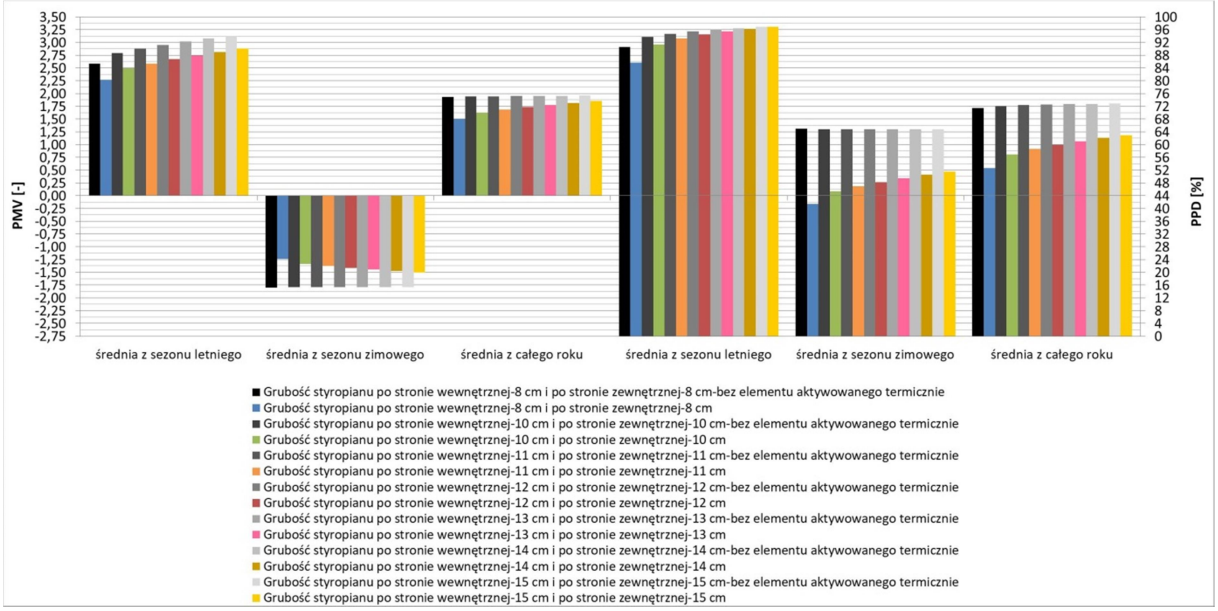
- Temperatura zasilania równa 22°C

Wskaźnik PMV wyniósł 0,40 dla sezonu letniego, -0,72 dla sezonu zimowego oraz -0,64 dla całego roku dla wszystkich grubości izolacji (Rys. 8.17) przegrody z elementem aktywowanym termicznie. W przypadku wskaźnika PPD zanotowano wartości z zakresu od 8,48% do 8,52% (sezon letni), 15,94% – 15,98% (sezon zimowy) oraz od 14,06% do 14,10% (dla całego roku). Zbliżone wartości wskaźnika PMV otrzymano dla ściany zewnętrznej bez przewodów: 0,39 – 0,40 (sezon letni), -0,74 – 0,73 (sezon zimowy) oraz -0,65 dla całego roku. Odnośnie wskaźników PPD były to wartości od 8,42% do 8,46% (lato), 16,26% – 16,46% (zima) oraz 14,30% – 14,44% (cały rok).



Rys. 8.17. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm

Dla temperatury zasilania równej 22°C i w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze osiągnięto najniższe wartości wskaźnika PPD dla 8 cm grubości styropianu: 85,57% dla sezonu letniego, 41,45% dla sezonu zimowego, a dla całego roku 52,56%, natomiast najwyższe dla 15 cm izolacji i równe: 96,86% (lato), 51,47% (zima) oraz 62,90% dla całego roku (Rys. 8.18). Wskaźnik PMV zawierał się w zakresie: 2,27 – 2,87 (sezon letni) – odczucie między ciepło a gorąco, -1,50 – -1,24 (sezon zimowy) – między chłodno a lekko chłodno i 1,50 – 1,85 (dla całego roku) – między lekko ciepło a ciepło. W porównaniu z rezultatami dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie to wartości dla wskaźnika PPD w sezonie letnim są do siebie zbliżone w największym stopniu dla: 13 cm (96,01% – bez przewodów, 95,50% – z przewodami), 14 cm (96,46% – bez przewodów, 96,27% – z przewodami), a dla 15 cm wynik dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie jest niższy (96,83% – bez przewodów, 96,86% – z przewodami).



Rys. 8.18. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od grubości styropianu 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm i 15 cm w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

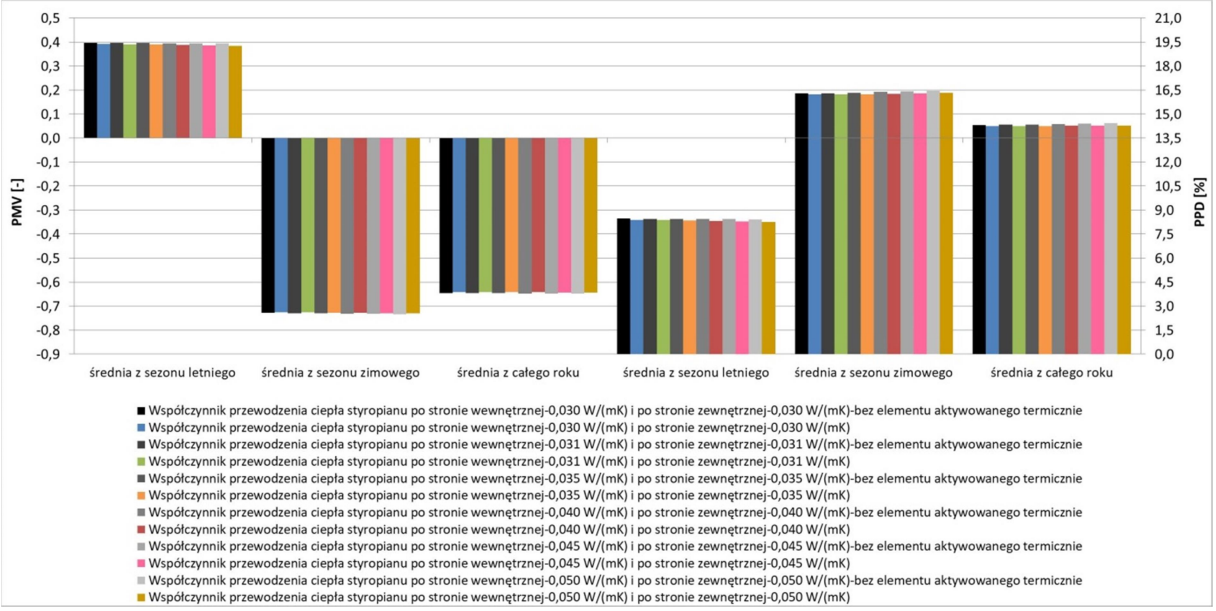
8.2.4. Komfort cieplny a współczynnik przewodzenia ciepła styropianu

W przypadku współczynnika przewodzenia ciepła styropianu przeanalizowano warianty: 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K) dla izolacji o grubości 13 cm ściany zewnętrznej wykonanej z 15 cm grubości betonu przegrody z oraz bez elementu aktywowanego termicznie. Wyniki przedstawiono dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla którego wyznaczono wartości wskaźnika PMV oraz PPD.

- Temperatura zasilania równa 16°C

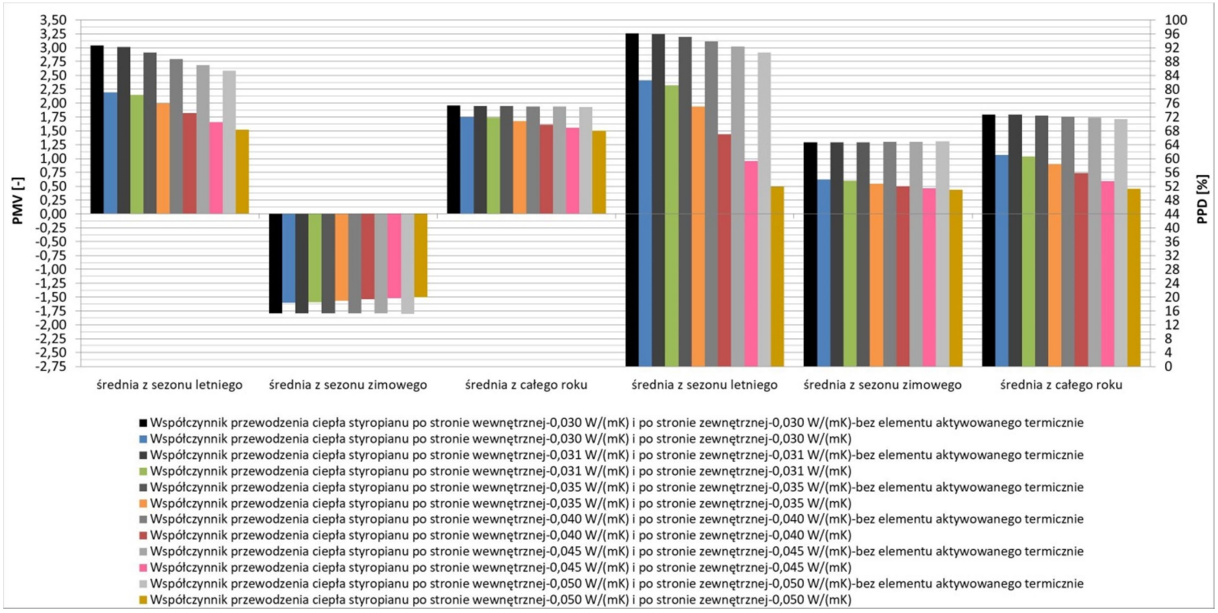
Dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie średnie wartości wskaźnika PMV zawierały się w zakresie od 0,38 do 0,39 dla sezonu letniego, -0,73 w sezonie zimowym, -0,65 – -0,64 dla całego roku (Rys. 8.19). W przypadku wskaźnika PPD zanotowano wartości od 8,27% do 8,38% dla sezonu letniego, w przedziale 16,21% – 16,31% dla okresu zimowego oraz od 14,24% do 14,29% dla całego roku. Dla ściany zewnętrznej bez przewodów były to wartości: 0,39 – 0,40 (PMV) i 8,42% – 8,46% (PPD) dla sezonu letniego, -0,73 (PMV) i 16,29% – 16,46% (PPD) dla sezonu zimowego oraz -0,65 (PMV) i 14,32% – 14,44% (PPD) dla całego roku. Dla obu wariantów przegrody zmodyfikowanej i nie, najwyższe wartości wskaźników PMV i PPD w sezonie letnim odnosiły się do współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,030 W/(m·K), a najniższe dla 0,050 W/(m·K). W sezonie zimowym

i dla całego roku w przypadku wskaźników PPD sytuacja była odwrotna: 0,030 W/(m·K) – minimum, a 0,050 W/(m·K) – maksimum.



Rys. 8.19. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)

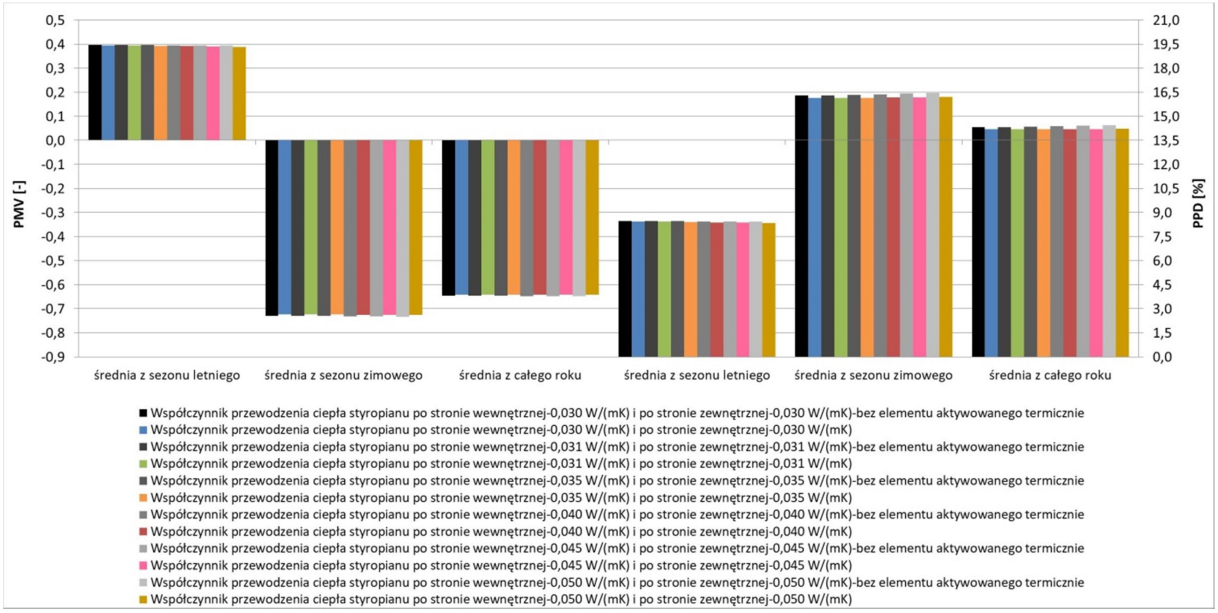
Na poniższym wykresie (Rys. 8.20) przedstawiono wartości wskaźników PMV oraz PPD w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze. Dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie wskaźniki osiągnęły wartości: 51,92% – 82,55% (PPD) i 1,52 – 2,19 (PMV) dla sezonu letniego, 51,04% – 53,83% (PPD) i -1,60 – -1,50 (PMV) dla sezonu zimowego oraz 51,26% – 61,07% (PPD) i 1,51 – 1,75 (PMV) dla całego roku. Największe wartości uzyskano dla współczynnika przewodzenia ciepła styropianu równego 0,030 W/(m·K), a najniższe dla 0,050 W/(m·K). Interpretując wielkości PMV można stwierdzić, że w sezonie letnim było między lekko ciepło a ciepło a gorąco, w sezonie zimowym pomiędzy lekko chłodno a chłodno, a średnio dla całego roku między lekko ciepło a ciepło. W przypadku przegrody bez modyfikacji odczucie było gorsze, czyli w sezonie letnim – pomiędzy ciepło a gorąco a gorąco (PMV w zakresie 2,59 – 3,04), w sezonie zimowym – pomiędzy lekko chłodno a chłodno (PMV w przedziale -1,80 – -1,79), a dla całego roku – ciepło (PMV od 1,93 do 1,95). Odnośnie wskaźnika PPD to osiągnął poziom: od 90,61% do 96,22% w sezonie letnim, od 64,75% do 64,95% w sezonie zimowym, a dla całego roku w zakresie 71,42% – 72,68%. Wartości najniższe dla sezonu letniego i dla całego roku dotyczą współczynnika przewodzenia ciepła styropianu równego 0,050 W/(m·K), a największe współczynnika 0,030 W/(m·K), w sezonie zimowym tendencja ta jest odwrotna.



Rys. 8.20. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 16°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K) w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

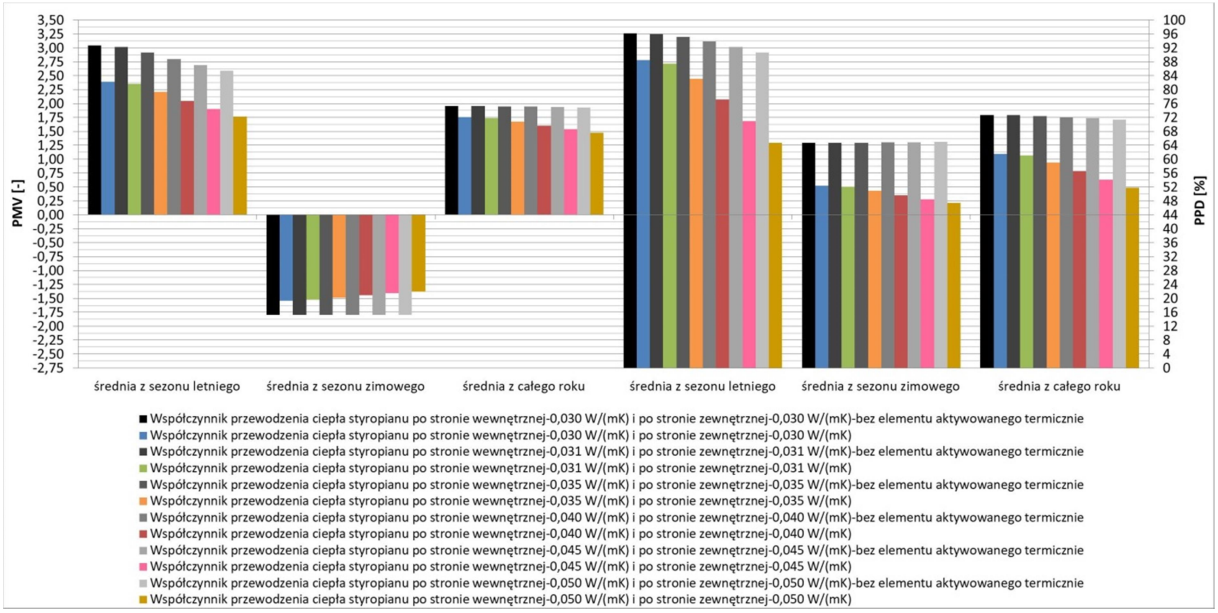
- Temperatura zasilania równa 18°C

Wartości średnie z sezonu letniego, zimowego i dla całego roku przedstawiono na wykresie (Rys. 8.21). Dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie wartości te są do siebie zbliżone i wynoszą: dla sezonu letniego 0,39 (PMV) i 8,34% – 8,42% (PPD), dla sezonu zimowego od -0,73 do -0,72 (PMV) i 16,13% – 16,19% (PPD) oraz dla całego roku -0,64 (PMV) i 14,19% – 14,21% (PPD). Najniższe wartości w sezonie letnim dotyczą współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,050 W/(m·K), a najwyższe dla wartości 0,030 W/(m·K). W sezonie zimowym i dla całego roku dla współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,030 W/(m·K) zarejestrowano najniższe wartości wskaźnika PPD, a najwyższe dla 0,050 W/(m·K). Taka sama sytuacja wystąpiła dla ściany zewnętrznej bez przewodów. W sezonie letnim zanotowano wskaźniki PPD w przedziale od 8,42% (dla 0,050 W/(m·K)) do 8,46% (dla 0,030 W/(m·K)), w sezonie zimowym i dla całego roku odpowiednio: 16,29% – 16,46% oraz 14,32% – 14,44% (najniższa wartość dla 0,030 W/(m·K), a najwyższa dla 0,050 W/(m·K)). Wskaźniki PMV wyniosły wówczas: od 0,39 do 0,40 dla sezonu letniego, -0,73 dla sezonu zimowego i -0,65 dla całego roku.



Rys. 8.21. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)

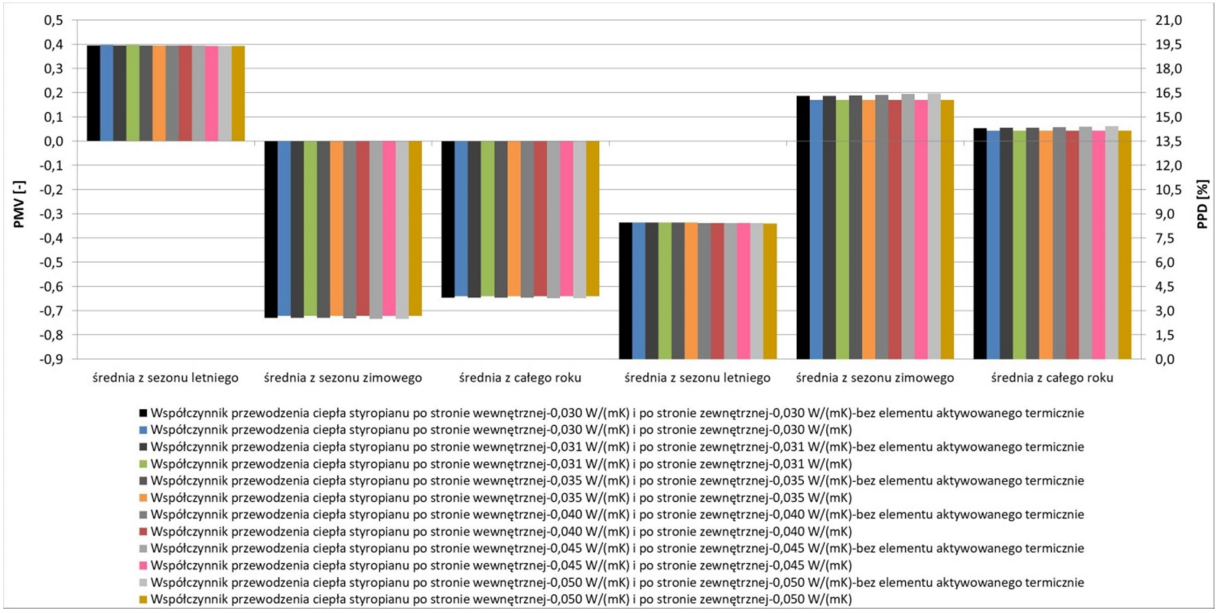
W sytuacji niedostarczenia energii cieplnej i chłodniczej dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie zanotowano wartości PPD: od 64,74% do 88,45% w sezonie letnim, od 47,50% do 52,42% w sezonie zimowym i dla całego roku od 51,84% do 61,50% (Rys. 8.22). Najmniejsze wartości dotyczą współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,050 W/(m·K), a największe dla 0,030 W/(m·K). W kwestii wskaźnika PMV to zarejestrowano wartości równe: 1,77 – 2,39 (między lekko ciepło a ciepło a gorąco) w sezonie letnim, w sezonie zimowym od -1,54 do -1,38 (między lekko chłodno a chłodno), natomiast dla całego roku od 1,48 do 1,75, czyli między lekko ciepło a ciepło. W przypadku ściany zewnętrznej bez przewodów wskaźniki osiągnęły wartości wyższe, czyli; w sezonie letnim 90,61% – 96,22% (PPD) i 2,59 – 3,04 (PMV), w sezonie zimowym 64,75% – 64,95% (PPD) i -1,80 – -1,79 (PMV) oraz średnia dla całego roku 71,42% – 72,68% (PPD) i 1,93 – 1,95 (PMV).



Rys. 8.22. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 18°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K) w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

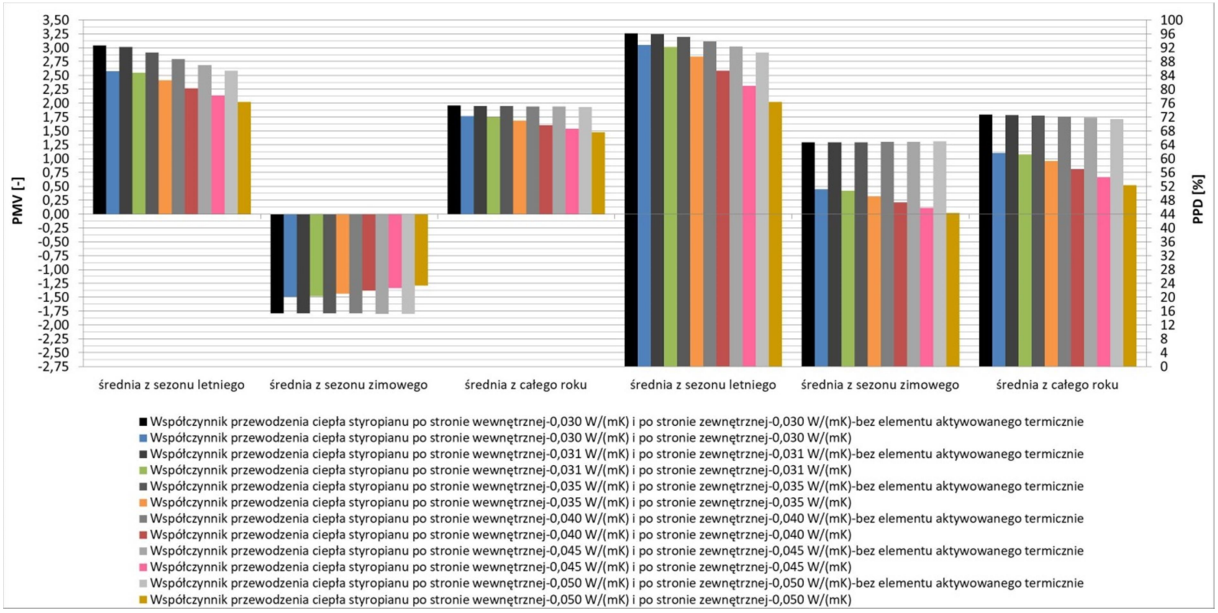
- Temperatura zasilania równa 20°C

Wskaźnik PMV wyniósł 0,40 dla sezonu letniego, -0,72 dla sezonu zimowego oraz -0,64 dla całego roku dla wszystkich współczynników przewodzenia ciepła styropianu przegrody z elementem aktywowanym termicznie (Rys. 8.23). Dla wskaźnika PPD średnie wartości zawierały się w przedziale 8,41% – 8,47% dla sezonu letniego, w sezonie zimowym 16,06%, a dla całego roku od 14,13% do 14,14%. Najniższe wartości dotyczyły współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,050 W/(m·K), a najwyższe dla 0,030 W/(m·K). W przypadku ściany zewnętrznej bez przewodów wskaźniki PMV były do siebie również zbliżone, osiągając wartości od 0,39 do 0,40 dla sezonu letniego, -0,73 dla sezonu zimowego i -0,65 dla całego roku. W kwestii wskaźników PPD były to wartości: od 8,42% (dla 0,050 W/(m·K)) do 8,46% (dla 0,030 W/(m·K)) w sezonie letnim, w sezonie zimowym i dla całego roku: od 16,29% do 16,46% oraz od 14,32% do 14,44% (dla 0,030 W/(m·K) – minimum, dla 0,050 W/(m·K) – maksimum).



Rys. 8.23. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)

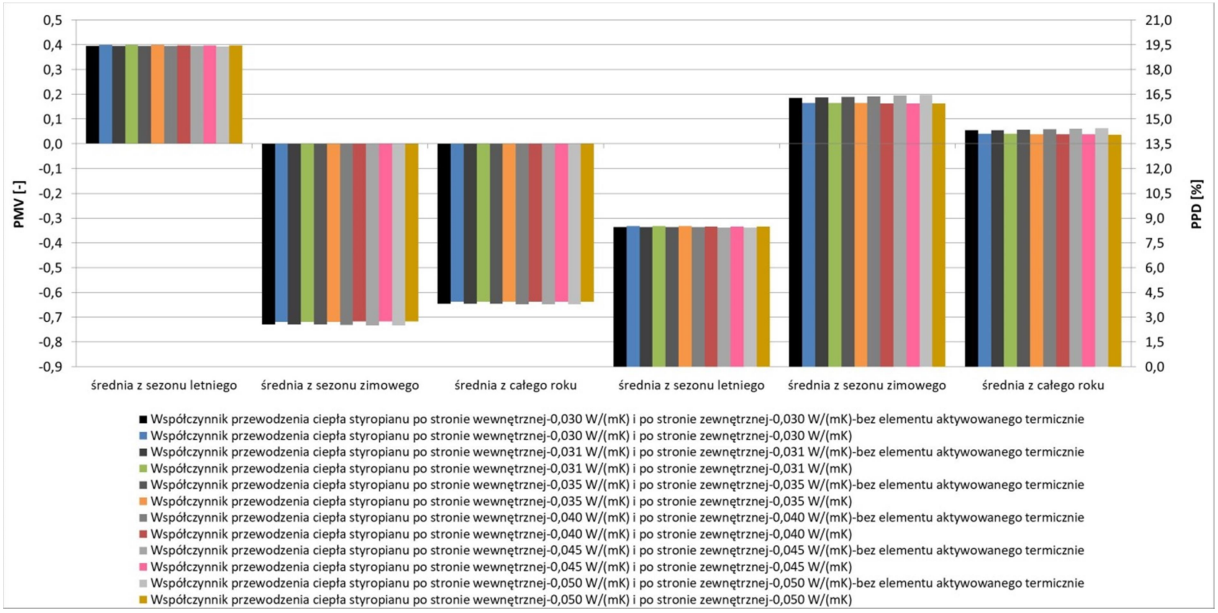
Dla ściany zewnętrznej z przewodami i jednoczesnym niedostarczeniem energii cieplnej i chłodniczej zarejestrowano wartości wskaźników PPD i PMV na poziomie: od 76,39% do 92,84% i PMV w przedziale 2,02 – 2,58 dla sezonu letniego, od 44,29% do 51,12% i PMV w przedziale -1,49 – -1,29 dla sezonu zimowego oraz dla całego roku od 52,38% do 61,63% i PMV w przedziale 1,48 – 1,77 dla sezonu zimowego (Rys. 8.24). Wartości maksymalne odnoszą się do współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,030 W/(m·K), a minimalne do wartości 0,050 W/(m·K). Odczucie w poszczególnych okresach scharakteryzowano jako: między ciepło a gorąco w sezonie letnim, pomiędzy chłodno a lekko chłodno oraz dla całego roku między lekko ciepło a ciepło. W przypadku przegrody bez elementu aktywowanego termicznie wartości wskaźników PMV były wyższe podobnie jak wskaźniki PPD.



Rys. 8.24. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 20°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K) w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

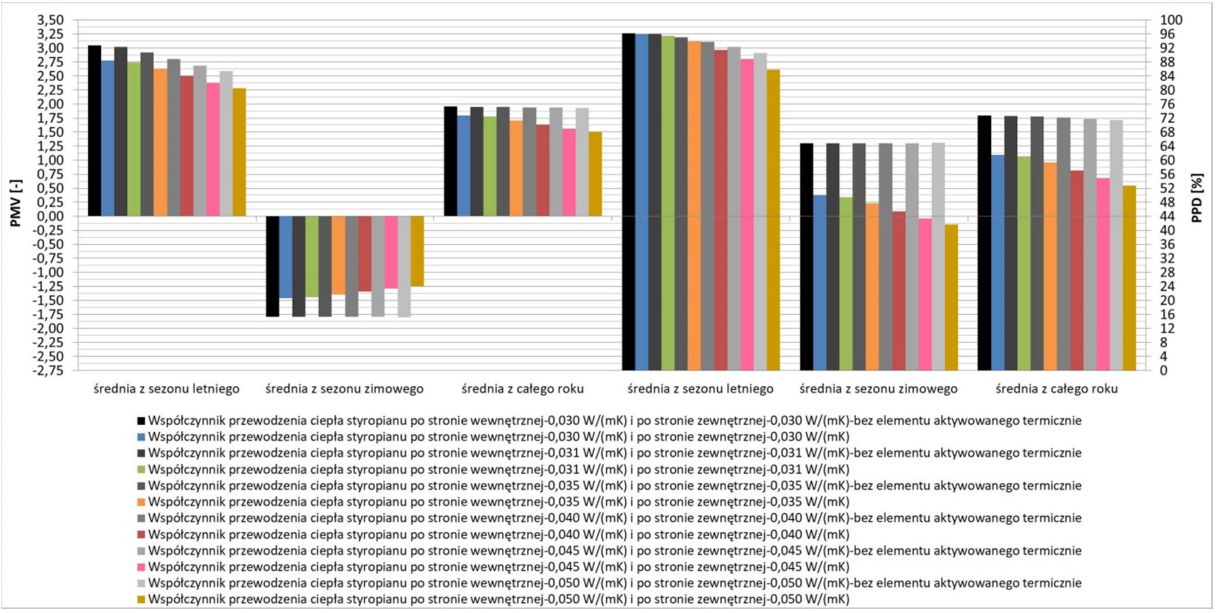
- Temperatura zasilania równa 22°C

W przypadku temperatury zasilania równej 22°C średnie wartości wskaźnika PMV liczyły 0,40 dla sezonu letniego, -0,72 dla sezonu zimowego oraz -0,64 dla całego roku (Rys. 8.25). Dla parametru PPD zanotowano średnie wartości od 8,48% do 8,51% dla sezonu letniego, dla sezonu zimowego w przedziale 15,94% – 15,98%, a dla całego roku od 14,06% do 14,10%. Najniższe wartości dotyczyły współczynnika przewodzenia ciepła równego 0,050 W/(m·K), a najwyższe dla 0,030 W/(m·K), podobnie jak dla sezonu letniego w sytuacji zastosowania przegrody bez modyfikacji, gdy otrzymano rezultaty dla wskaźników PPD w przedziale od 8,42% do 8,46%, a PMV od 0,39 do 0,40. Dla sezonu zimowego i całego roku uzyskano wartości -0,73 i -0,65 (PMV) oraz od 16,29% do 16,46% i w przedziale 14,32% – 14,44% (najwyższa wartość dla 0,050 W/(m·K), a najniższa dla 0,030 W/(m·K)).



Rys. 8.25. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K)

Na poniższym wykresie (Rys. 8.26) przedstawiono wskaźniki PMV i PPD dla przegrody bez oraz z elementem aktywowanym termicznie podczas niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze. W sezonie letnim wartości wskaźników dla ściany zewnętrznej z przewodami wyniosły: 85,80% – 95,86% (PPD) i 2,28 – 2,77 (PMV) w sezonie letnim, 41,58% – 49,94% (PPD) i -1,46 – -1,24 (PMV) w sezonie zimowym, natomiast dla całego roku 52,72% – 61,51% (PPD) i 1,50 – 1,79 (PMV). Wartości wskaźników PMV można objaśnić jako: między ciepło a gorąco w sezonie letnim, między chłodno a lekko chłodno w sezonie zimowym, a dla całego roku między lekko ciepło a ciepło. W przypadku rozwiązania bez przewodów w sezonie letnim wartości dla wskaźników PPD były zbliżone. Dla współczynnika przewodzenia ciepła 0,030 W/(m·K) wyniosły odpowiednio: 96,22% dla ściany zewnętrznej bez przewodów i 95,86% dla rozwiązania z modyfikacją, dla 0,031 W/(m·K) 96,01% – bez elementu aktywowanego termicznie, 95,50% – z przewodami.



Rys. 8.26. Średnie wartości wskaźników PMV oraz PPD dla sezonu letniego, zimowego i całego roku dla pomieszczenia nr 5 – pokoju dla przegrody (ściany zewnętrznej) bez elementu aktywowanego termicznie oraz dla temperatury zasilania przegrody aktywowanej termicznie (ściany zewnętrznej) równej 22°C w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K) w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze

8.2.5. Wnioski

W przypadku zastosowania przegrody z elementem aktywowanym termicznie dla sytuacji z pokrytym zapotrzebowaniem na cele grzewcze i chłodnicze wartości wskaźników PPD oraz PMV zawierały się w poniższych zakresach dla danej zmiennej. Dla sezonu letniego były to przedziały: 8,37% – 8,51% (PPD) i 0,39 – 0,40 (PMV) dla zmiennej wartości temperatury zasilania i grubości betonu, 8,26% – 8,52% (PPD) i 0,38 – 0,40 (PMV) dla zmiennej grubości styropianu oraz 8,27% – 8,51% (PPD) i 0,38 – 0,40 (PMV) dla zmiennej wartości współczynnika przewodzenia ciepła styropianu. W kwestii sezonu zimowego były to wartości z zakresów: 15,97% – 16,22% (PPD) dla zmiennej wartości temperatury zasilania, 15,98% – 16,22% (PPD) dla zmiennej grubości betonu, 15,94% – 16,32% (PPD) dla zmiennej grubości styropianu oraz 15,94% – 16,31% (PPD) dla zmiennej wartości współczynnika przewodzenia ciepła styropianu. Wartości wskaźników PMV były takie same dla każdej z 4 opcji i mieściły się w zakresie -0,73 – -0,72. Dla całego roku zanotowano przedziały: 14,09% – 14,24% (PPD) dla zmiennej wartości temperatury zasilania i grubości betonu, 14,06% – 14,29% (PPD) dla zmiennej grubości i wartości współczynnika przewodzenia ciepła styropianu. Wartości wskaźników PMV były takie same dla 3 opcji i równe -0,64, dla współczynnika przewodzenia ciepła styropianu zawierały się w przedziale -0,65 – -0,64 (PMV). Wyniki te świadczą o tym, że każdy z sezonów bez względu na rodzaj zmiennej charakteryzuje się warunkami odpowiednimi, gdyż w żadnym przypadku wartość wskaźnika PPD nie przekroczyła 25%, a PMV 1 (odczucie lekko ciepło) bądź -1 (odczucie lekko chłodno).

Zgodnie z wykonanymi analizami zauważono, że w przypadku symulacji przeprowadzonych dla sytuacji z pokrytym zapotrzebowaniem na cele grzewcze i chłodnicze,

największe rozbieżności pomiędzy poszczególnymi wariantami w przypadku wskaźników PPD dla przegrody z przewodami wystąpiły podczas zmiany temperatury zasilania. Różnice te, dokładniej między wartościami dla temperatury zasilania równej 16°C i 22°C wyniosły -0,14% (sezon letni), 0,24% (sezon zimowy) oraz 0,15% (dla całego roku). W przypadku wskaźników PMV rozbieżności były niewielkie bez względu na wariant i mieściły się w zakresie -0,01% – 0,01%. Najmniejsze różnice wartości wskaźników PPD i PMV między określonymi wariantami zaobserwowano dla zmiennej grubości betonu, zmiany te są wręcz niezauważalne dla danej wartości temperatury zasilania. W przypadku uwzględnienia wszystkich wariantów w zakresie danej zmiennej największe różnice pojawiły się dla zmiennej grubości styropianu między wariantami o grubości 8 cm a wartościami temperatury zasilania 16°C i 22°C i osiągnęły wtedy poziom dla wskaźników PPD wartości równe: -0,22% (sezon letni), 0,38% (sezon zimowy) oraz 0,23% (dla całego roku), natomiast dla wskaźników PMV: -0,02 (lato), 0,01 (zima) i 0,00 (cały rok). W przypadku najmniejszych rozbieżności między danym wariantem, a temperaturą zasilania 22°C, dotyczyły one zmiennej wartości współczynnika przewodzenia ciepła, a ściślej różnicy pomiędzy wartościami temperatury 20°C i 22°C dla 0,03 W/(m·K). Różnice dla wskaźników PPD wyniosły: -0,04% (sezon letni), 0,08% (sezon zimowy) oraz 0,04% (dla całego roku), a dla wskaźników PMV różnice 0,00 dla każdego z okresów i dla całego roku.

Analizy dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie dla sytuacji z pokrytym zapotrzebowaniem na cele grzewcze i chłodnicze wykazały, że wartości wskaźników PPD oraz PMV osiągnęły wartości dla sezonu letniego: 8,46% (PPD) i 0,40 (PMV) dla ściany zewnętrznej wykonanej z 15 cm grubości betonu i docieplonej 13 cm warstwą styropianu po obu stronach oraz dla zmiennej grubości betonu, 8,42% – 8,46% (PPD) i 0,39 – 0,40 (PMV) dla zmiennej grubości styropianu i jego wartości współczynnika przewodzenia ciepła. Dla sezonu zimowego w przypadku ściany zewnętrznej wykonanej z 15 cm grubości betonu i docieplonej 13 cm warstwą styropianu po obu stronach oraz dla zmiennej grubości betonu zanotowano wartości 16,30% (PPD) i -0,73, dla zmiennej grubości styropianu 16,26% – 16,46% (PPD) i -0,74 – -0,73 (PMV), a dla zmiennej wartości współczynnika przewodzenia ciepła 16,29% – 16,46% (PPD) i -0,73 (PMV). Dla całego roku wartości wskaźnika PPD wyniosły 14,32% dla ściany zewnętrznej wykonanej z 15 cm grubości betonu i docieplonej 13 cm warstwą styropianu po obu stronach, 14,33% dla zmiennej grubości betonu, 14,30% – 14,44% dla zmiennej grubości styropianu oraz 14,32% – 14,44% dla zmiennej wartości współczynnika przewodzenia ciepła styropianu. W przypadku wartości wskaźnika PMV zaobserwowano taką samą wartość dla każdej z 4 zmiennych równą -0,65. Wynika z tego, że przez cały rok warunki są odpowiednie, wartości wskaźników PPD i PMV nie przekroczyły wartości: 25% oraz 1 bądź -1 (wrażenie lekko ciepło bądź lekko chłodno).

Dla rozwiązania ściany zewnętrznej bez elementu aktywowanego termicznie największy wzrost wartości wskaźników PPD względem rozwiązania z przewodami zanotowano dla grubości styropianu równej 8 cm. Dla sezonu letniego był to przypadek dla temperatury zasilania 16°C równy 0,16%, a dla sezonu zimowego i całego roku dla temperatury zasilania równej 22°C na poziomie 0,52% i 0,38%. Różnice dla wartości wskaźników PMV wyniosły wówczas 0,01 (lato), 0,02 (zima) oraz 0,01 (dla całego roku). Odnośnie najmniejszych różnic w przypadku temperatury zasilania 20°C w sezonie letnim osiągnięto takie same wartości

wskaźników PPD i PMV jak dla przegrody bez przewodów. W sezonie zimowym natomiast dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie wartość wskaźnika PPD była wyższa o 0,06% od przegrody z temperaturą zasilania równą 16°C i grubością styropianu na poziomie 15 cm, a wartość wskaźnika PMV pozostała taka sama. Dla tego samego wariantu osiągnięto najmniejszą różnicę dla całego roku równą 0,07% (PPD) i 0,01 (PMV).

Wyniki uzyskane w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze dla przegrody z przewodami zawierały się w zakresach zależnych od rodzaju zmiennej. Dla zmiennej wartości temperatury zasilania osiągnięto wartości: dla sezonu letniego 81,11% – 95,50% (PPD) i 2,15 – 2,74 (PMV), dla sezonu zimowego 49,46% – 53,60% (PPD) i -1,59 – -1,45 (PMV), a dla całego roku 60,54% – 61,17% (PPD) i 1,74 – 1,77 (PMV). Dla grubości betonu rezultaty mieściły się w zakresach: dla sezonu letniego 80,98% – 95,59% (PPD) i 2,15 – 2,75 (PMV), dla sezonu zimowego 49,42% – 53,65% (PPD) i -1,60 – -1,45 (PMV), a dla całego roku 60,49% – 61,29% (PPD) i 1,73 – 1,78 (PMV). W przypadku zmiennej grubości styropianu zanotowano wartości: dla sezonu letniego od 51,40% do 96,86% (PPD) i od 1,51 do 2,87 (PMV), dla sezonu zimowego od 41,45% do 54,62% (PPD) i od -1,63 do -1,24 (PMV), a dla całego roku od 51,12% do 63,07% (PPD) i od 1,47 do 1,85 (PMV). Dla współczynnika przewodzenia ciepła wartości zawierały się w przedziałach: dla sezonu letniego od 51,92% do 95,86% (PPD) i od 1,52 do 2,77 (PMV), dla sezonu zimowego od 41,58% do 53,83% (PPD) i od -1,60 do -1,24 (PMV), a dla całego roku od 51,26% do 61,63% (PPD) i od 1,48 do 1,79 (PMV). Świadczy to o tym, że dla zmiennej wartości temperatury zasilania i grubości betonu w sezonie letnim warunki były pomiędzy ciepło a gorąco, dla sezonu zimowego między chłodno a lekko chłodno, a dla całego roku między lekko ciepło a ciepło. Dla zmiennej grubości styropianu i jego współczynnika przewodzenia ciepła sezon letni charakteryzował się warunkami pomiędzy lekko ciepło a ciepło a gorąco, sezon zimowy między chłodno a lekko chłodno, a dla całego roku między lekko ciepło a ciepło.

W sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze różnice pomiędzy poszczególnymi wariantami dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie były bardziej dostrzegalne. Maksymalne rozbieżności wskaźników zarejestrowano dla zmiennej grubości styropianu między 15 cm i 8 cm. Dla sezonu letniego i całego roku największe różnice wartości dla wskaźników PPD dla wspomnianych grubości styropianu odnosiły się do temperatury zasilania 16°C i były równe: 35,39% (PPD) i 0,83 (PMV) oraz 11,61% (PPD) i 0,31 (PMV). Dla temperatury zasilania 20°C zanotowano maksymalną różnicę w sezonie zimowym równą 8,25% (PPD) i 0,24 (PMV). Najmniejsze rozbieżności skrajnych wartości danych wariantów dla sezonu letniego i zimowego zauważono dla zmiennej grubości betonu między wartościami 30 cm i 10 cm. Dla sezonu letniego były to wartości 0,48% (PPD) i 0,01 (PMV) dla temperatury zasilania 16°C, a dla sezonu zimowego temperatura zasilania 20°C z różnicami 0,13% (PPD) i 0,00 (PMV). Dla całego roku był to przypadek z różnicą dla wskaźników PPD między temperaturą zasilania 22°C, a 18°C równą 0,05% (PMV równe 0,04). Analizując wszystkie warianty należące do danej modyfikacji zauważono, że największe różnice wskaźników PPD między temperaturą zasilania 22°C a danym wariantem odnosiła się do grubości styropianu 8 cm i temperatury 16°C. Dla sezonu letniego były to wartości 34,17% (PPD) i 0,76 (PMV), dla sezonu

zimowego -9,57% (PPD) i -0,26 (PMV), a dla całego roku 1,45% (PPD) i 0,00 (PMV). W takiej sytuacji najmniejsze różnice dla sezonu letniego i zimowego pojawiły się między temperaturą zasilania 22°C a 20°C z grubością styropianu 15 cm i były równe 2,24% (PPD) i 0,18 (PMV) oraz -0,97% (PPD) i -0,03 (PMV). Dla całego roku sytuacja ta wystąpiła dla temperatury zasilania 18°C i współczynnika przewodzenia ciepła styropianu 0,03 W/(m·K) i była równa 0,01% (PPD) i 0,04 (PMV).

Dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze wartości wskaźników PPD oraz PMV wyniosły dla sezonu letniego: 96,01% (PPD) i 3,02 (PMV) dla ściany zewnętrznej wykonanej z 15 cm grubości betonu i docieplonej 13 cm warstwą styropianu po obu stronach, od 94,36% do 96,47% (PPD) i 2,92 – 3,04 (PMV) dla zmiennej grubości betonu, od 90,50% do 96,83% (PPD) i 2,58 – 3,12 (PMV) dla zmiennej grubości styropianu oraz od 90,61% do 96,22% (PPD) i 2,59 – 3,04 (PMV) dla zmiennej wartości współczynnika przewodzenia ciepła styropianu. Dla sezonu zimowego osiągnięto wartości: 64,75% (PPD) i -1,79 (PMV) dla ściany zewnętrznej wykonanej z 15 cm grubości betonu i docieplonej 13 cm warstwą styropianu po obu stronach, od 64,28% do 64,85% (PPD) i -1,80 – -1,79 (PMV) dla zmiennej grubości betonu, od 64,76% do 64,96% (PPD) i -1,80 (PMV) dla zmiennej grubości styropianu oraz od 64,75% do 64,95% (PPD) i -1,80 – -1,79 (PMV) dla zmiennej wartości współczynnika przewodzenia ciepła styropianu. W kwestii całego roku zarejestrowano wartości: 72,62% (PPD) i 1,95 (PMV) dla ściany zewnętrznej wykonanej z 15 cm grubości betonu i docieplonej 13 cm warstwą styropianu po obu stronach, od 71,86% do 72,81% (PPD) i 1,94 – 1,96 (PMV) dla zmiennej grubości betonu, od 71,40% do 72,84% (PPD) i 1,93 – 1,96 (PMV) dla zmiennej grubości styropianu oraz od 71,42% do 72,68% (PPD) i 1,93 – 1,95 (PMV) dla zmiennej wartości współczynnika przewodzenia ciepła styropianu. Wniosek z tego, że w sezonie letnim odczucie było między ciepło a gorąco a gorąco, w sezonie zimowym między chłodno a lekko chłodno, a dla całego roku ciepło.

Porównując uzyskane rezultaty z wynikami osiągniętymi dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze zauważono, że maksymalne różnice wskaźników PPD wystąpiły dla zmiennej grubości styropianu. Dla sezonu letniego i dla całego roku odnosiła się do temperatury zasilania 16°C z grubością styropianu 8 cm i różnice wyniosły wówczas 39,10% (PPD) i 1,07 (PMV) oraz 20,28% (PPD) i 0,43 (PMV). Dla sezonu zimowego osiągnięto wartości: 23,52% (PPD) i 0,56 (PMV) dla temperatury zasilania 22°C z grubością styropianu 8 cm. W kwestii najmniejszych różnic dla wartości wskaźników PPD między przegrodą bez elementu aktywowanego termicznie a danym wariantem zanotowano wartości: -0,03% (PPD) i 0,25 (PMV) dla sezonu letniego, 10,14% (PPD) i 0,17 (PMV) dla sezonu zimowego oraz 9,77% (PPD) i 0,13 (PMV) dla całego roku. Wartości te dotyczyły grubości styropianu 15 cm i odpowiednio: temperatury zasilania 22°C dla sezonu letniego, dla sezonu zimowego temperatury zasilania 16°C, a dla całego roku temperatury zasilania 20°C. W sezonie letnim dla przegrody o grubości warstwy betonu 30 cm i styropianu po 13 cm z obu stron oraz dla temperatury zasilania 22°C zanotowano różnicę wartości wskaźników PPD między przegrodą z i bez przewodów na poziomie 1,23% i była to najwyższa taka rozbieżność, różnica PMV wyniosła wtedy -0,16.

9. Podsumowanie

9.1. Wnioski końcowe

W rozdziale 1 przedstawiono uzasadnienie podjęcia tematu na podstawie danych literaturowych i obliczeń. W podrozdziale 1.2 dotyczącym literatury opisano rozwiązania eksperymentalne i komercyjne wykazujące możliwości wykorzystania przegród z elementami aktywowanymi termicznymi do celów grzewczych i chłodniczych oraz potencjał do dalszego rozwoju tego zagadnienia. W kolejnej części rozdziału – podrozdział 1.3 zaprezentowano analizę rozkładu temperatury dla przegrody bez oraz z elementem aktywowanym termicznie. Wykazano dzięki niej, że w zależności od wartości temperatury wewnętrznej, zewnętrznej oraz zasilania przewodów w przegrodzie można zmniejszyć, zwiększyć bądź zmienić kierunek strumienia ciepła z pomieszczenia w porównaniu do przegrody bez przewodów.

Podstawowe tezy pracy, jej cel i zakres sformułowano w rozdziale 2. W rozprawie skoncentrowano się na udowodnieniu stwierdzenia, że przegroda aktywowana termicznie w postaci ściany zewnętrznej zmniejsza zużycie energii przy jednoczesnym zapewnieniu komfortu cieplnego oraz jest elementem wspomagającym system grzewczy lub chłodniczy.

Rozdział 3 został poświęcony aktualnemu stanowi badań na temat przegród aktywowanych termicznie. W podrozdziale 3.1 skoncentrowano się na wynikach modelowania i pomiarów eksperymentalnych w obiektach i komorach klimatycznych, natomiast w podrozdziale 3.2 przybliżono wyniki badań doświadczalnych przegród aktywowanych termicznie. W przypadku modelowania autorzy w większości przypadków wykorzystywali programy: ABAQUS, ANSYS oraz COMSOL bądź własne narzędzia, np. program CalA 3.0 lub modele oparte na metodzie RC. Autorzy wykazali dzięki obliczeniom zmniejszenie strat ciepła na zewnątrz dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie w porównaniu do przegrody tradycyjnej, natomiast pomiary eksperymentalne ukazały niebezpieczeństwo przegrzewania się pomieszczeń. Na podstawie wykonanego przeglądu literatury można wyciągnąć kolejny wniosek odnośnie aktualności tej tematyki – 6 publikacji ukazało się w 2022 roku.

Własny opracowany model ściany zewnętrznej zaprezentowano w rozdziale 4 wraz z uzyskanymi wynikami przedstawionymi w podrozdziale 4.4 dla 4 wartości temperatury zasilania przewodów w ścianie zewnętrznej: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C oraz dla 3 etapów badań: stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody, przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni oraz wymuszeniu skokowemu temperatury zewnętrznej. Poprzednie 3 podrozdziały dotyczyły: charakterystyki i klasyfikacji metod numerycznych (4.1), wyboru metody numerycznej, czyli metody bilansów elementarnych (4.2) oraz opisu modelu przewodzenia ciepła w przegrodzie (4.3). W sytuacji stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody różnice temperatury na powierzchni obu stron ściany nie były większe niż 0,64°C, podczas przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni różnice zawierały się w przedziale 8,32°C (dla temperatury zasilania 22°C) – 12,46°C (dla temperatury zasilania 20°C), wymuszenie skokowe natomiast charakteryzowało się

zakresem 10,08°C (dla temperatury zasilania 16°C) – 10,36°C (dla temperatury zasilania 20°C).

Rozdział 5 dotyczył badań eksperymentalnych. Opis stanowiska badawczego zawarto w podrozdziale 5.1, natomiast na kwestię odchyłek czujników temperatury przeznaczono osobny podrozdział 5.2. Przebieg badań oraz opracowanie ich rezultatów przedstawiono w podrozdziałach 5.3 oraz 5.4. Stanowisko badawcze składające się z betonowej zaizolowanej styropianem ściany posiadającej wewnątrz pętlę przewodów i obudowanej płytą OSB również zaizolowaną styropianem zostało wyposażone łącznie w 86 czujników temperatury. O lokalizacji czujników na powierzchni przegrody zadecydowała analiza odchyłek opisana w podrozdziale 5.2. Przebieg badań polegał na 3 etapach: stabilizacji temperatury na powierzchni przegrody, przebiegu temperatury zewnętrznej w okresie 2 dni oraz wymuszeniu skokowemu temperatury zewnętrznej dla 4 wartości temperatury zasilania przewodów w ścianie: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C. Na podstawie zarejestrowanych danych dla etapu stabilizacji temperatury stwierdzono, że czas potrzebny do osiągnięcia stanu stabilizacji nie przekracza doby. Badania przebiegu temperatury zewnętrznej wykazały, że przegroda aktywowana termicznie reaguje z opóźnieniem bądź nawet jest odporna na zmienną temperaturę zewnętrzną. Podobne wnioski wyciągnięto w sytuacji wymuszenia skokowego polegającego na utrzymywaniu różnicy temperatury po obu stronach przegrody równej co najmniej 10°C, mimo że czas reakcji czujników uległ skróceniu to nadal temperatura na powierzchni betonu nie zmieniła się o 0,1°C szybciej niż po 5 godzinach i 40 minutach.

Porównanie modelu numerycznego z badaniami doświadczalnymi opisano w rozdziale 6, który podzielono na 3 podrozdziały w zależności od etapu badań, który był oceniany. Wartość bezwzględna różnicy temperatury dla czujników umieszczonych centralnie na powierzchni betonu (B_W_07 i B_Z_07) oraz styropianu (S_W_2 i S_Z_2) bez względu na temperaturę zasilania pętli mieściła się w zakresie: 0,00°C – 0,19°C oraz 0,00°C – 0,35°C (dla etapu stabilizacji – podrozdział 6.1), 0,00°C – 0,10°C oraz 0,00°C – 0,78°C (dla etapu przebiegu – podrozdział 6.2) i 0,00°C – 0,17°C oraz 0,00°C – 3,96°C (dla etapu wymuszenia – podrozdział 6.3). W przypadku wartości bezwzględnej różnicy temperatury dla czujników umieszczonych na powierzchni przewodów najbliżej osi symetrii wewnątrz betonowej przegrody (P13 i P14) uwzględniając wszystkie badane temperatury zasilania pętli wartości zawierały się w przedziale: 0,00°C – 0,16°C (dla etapu stabilizacji – podrozdział 6.1), 0,00°C – 0,05°C (dla etapu przebiegu – podrozdział 6.2) i 0,00°C – 0,08°C (dla etapu wymuszenia – podrozdział 6.3). W przypadku wskaźników RMSE wyznaczonych dla wskazań wspomnianych czujników umieszczonych centralnie na powierzchni betonu, styropianu oraz przewodów nie przekraczały wartości: 0,07°C, 0,24°C oraz 0,09°C (dla etapu stabilizacji – podrozdział 6.1), 0,08°C, 0,55°C oraz 0,04°C (dla etapu przebiegu – podrozdział 6.2) i 0,08°C, 1,04°C oraz 0,07°C (dla etapu wymuszenia – podrozdział 6.3). Wynika z tego, że uzyskane rezultaty drogą numeryczna i doświadczalną są do siebie zbliżone.

W rozdziałach 7 i 8 wykorzystano program TRNSYS do analizy zużycia energii oraz komfortu cieplnego dla budynku 1 kondygnacyjnego z płaskim dachem o powierzchni 106 m^2 (11 pomieszczeń) z wentylacją mechaniczną nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła na poziomie 85%. Wyniki w tych rozdziałach przedstawiono dla pomieszczenia nr 5

– pokoju w sytuacji wykorzystania bądź nie przewodów w ścianie zewnętrznej dla sezonu letniego, zimowego i całego roku. Przestudiowano warianty z temperaturą zasilania elementu aktywowanego termiczne równą: 16°C, 18°C, 20°C i 22°C w ścianie zewnętrznej o łącznej grubości 41 cm (15 cm warstwa betonu i 13 cm warstwa styropianu z obu stron o współczynniku przewodzenia ciepła równym 0,031 W/(m·K)) (podrozdział 7.2.1 i 8.2.1). W następnym etapie dla takiej samej konstrukcji ściany zmieniono 4 krotnie grubość warstwy betonu osiągając wartości: 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm oraz 30 cm osiągając tym samym opory cieplne warstwy konstrukcyjnej równe: 0,04 m^2·K/W, 0,07 m^2·K/W, 0,09 m^2·K/W, 0,11 m^2·K/W i 0,13 m^2·K/W (podrozdział 7.2.2 i 8.2.2). W dalszej kolejności dla ściany betonowej o grubości 15 cm sprawdzono docieplenie styropianem o grubości: 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 13 cm, 14 cm oraz 15 cm o współczynniku przewodzenia ciepła równym 0,031 W/(m·K), czyli opory cieplne warstwy izolacyjnej wyniosły: 2,58 m^2·K/W, 3,23 m^2·K/W, 3,55 m^2·K/W, 3,87 m^2·K/W, 4,19 m^2·K/W, 4,52 m^2·K/W i 4,84 m^2·K/W (podrozdział 7.2.3 i 8.2.3). Następnie dla warstwy styropianu o grubości 13 cm zamontowanej na 15 cm warstwie betonu zbadano współczynnik przewodzenia ciepła styropianu równy: 0,030 W/(m·K), 0,031 W/(m·K), 0,035 W/(m·K), 0,040 W/(m·K), 0,045 W/(m·K) i 0,050 W/(m·K), zatem o oporze cieplnym warstwy izolacyjnej na poziomie: 2,60 m^2·K/W, 2,89 m^2·K/W, 3,25 m^2·K/W, 3,71 m^2·K/W, 4,19 m^2·K/W i 4,33 m^2·K/W (podrozdział 7.2.4 i 8.2.4).

W rozdziale 7 wykazano, że dla przegrody z elementem aktywowanym termicznie największe różnice pod kątem zapotrzebowania na moc wystąpiły dla zmiennej temperatury zasilania, a najmniejsze wręcz niezauważalne dla zmiennej grubości betonu. Dodatkowo porównując wyniki z rezultatami dla ściany zewnętrznej bez przewodów zauważono, że największe oszczędności uzyskano dla grubości styropianu 8 cm i wartości temperatury zasilania: 16°C latem i 22°C zimą na poziomie: 15,93% (lato) i 40,35% (zima).

Rezultaty osiągnięte w kwestii komfortu cieplnego omówione w rozdziale 8 zostały rozszerzone o sytuację niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze. W przypadku zastosowania przegrody z elementem aktywowanym termicznie dla sytuacji z pokrytym zapotrzebowaniem na cele grzewcze i chłodnicze wartości wskaźników PPD oraz PMV nie przekroczyły 25% (PPD) i 1 (odczucie lekko ciepło) bądź -1 (odczucie lekko chłodno) (PMV), czyli każdy z sezonów dla danego wariantu charakteryzował się warunkami obojętnymi. W odniesieniu do rozbieżności pomiędzy poszczególnymi wariantami największe różnice wystąpiły dla zmiennej temperatury zasilania a najmniejsze dla zmiennej grubości betonu. W zestawieniu z wynikami dla przegrody bez elementu aktywowanego termicznie, dla ściany zewnętrznej bez przewodów osiągnięto wyższe wartości wskaźnika PPD, jedynie dla temperatury zasilania 20°C w sezonie letnim wartości te się zrównały. Wartości te nadal pozostawały w warunkach obojętnych. Sytuacja ta uległa zmianie, gdy przebadano warianty dla niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze. Dla rozwiązania z przewodami w sezonie letnim warunki charakteryzowały się odczuciem pomiędzy ciepło a gorąco dla zmiennej wartości temperatury zasilania i grubości betonu oraz pomiędzy lekko ciepło a ciepło a gorąco dla zmiennej grubości styropianu i jego współczynnika przewodzenia ciepła. W sezonie zimowym natomiast wystąpiły warunki między chłodno a lekko chłodno, a dla całego roku między lekko ciepło a ciepło

dla wszystkich opcji przegrody. W przypadku rozbieżności pomiędzy poszczególnymi wariantami największe zanotowano dla zmiennej grubości styropianu, a najmniejsze dla zmiennej grubości betonu (lato i zima) oraz zmiennej temperatury zasilania (dla całego roku). W porównaniu z wynikami dla przegrody bez przewodów największe różnice zarejestrowano dla zmiennej grubości styropianu. Dla przegrody osiągnięto warunki między ciepło a gorąco a gorąco w sezonie letnim, w sezonie zimowym między chłodno a lekko chłodno, a dla całego roku ciepło.

9.2. Potencjał naukowy do kolejnych badań i analiz

Przegroda aktywowana termicznie może spełniać funkcję grzejną i chłodniczą. W pracy wykazano, że opory cieplne warstwy konstrukcyjnej nie wpływają na wskaźniki komfortu cieplnego. Czynniki instalacyjne, a co się z tym wiąże rozwiązanie źródła ciepła istotnie wpływa na komfort cieplny, co może stanowić podstawę analiz w przyszłych pracach, podobnie jak spostrzeżenie, że w sytuacji niepokrytego zapotrzebowania na cele grzewcze i chłodnicze grubość warstwy izolacji ma znaczenie. Kolejnym kierunkiem rozwoju może być wykorzystanie sporządzonego modelu przewodzenia ciepła w ścianie zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie jako elementu własnego modelu całego pomieszczenia. Dodatkowo w dalszych pracach można rozszerzyć badania o budownictwo wielorodzinne oraz użyteczności publicznej.

10. Literatura

[1] (2022). *Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie Dz.U. 2022 poz. 1225*.

[2] L. Lichołai, "Możliwości zastosowania odnawialnych źródeł energii w miastach przyszłości," *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury,* vol. XXXIV, no. 64 (3/II/17), pp. 181-192, 2017.

[3] L. Licholai, A. Starakiewicz, J. Krason, and P. Miasik, "The Influence of Glazing on the Functioning of a Trombe Wall Containing a Phase Change Material," (in English), *Energies,* Article vol. 14, no. 17, p. 19, Sep 2021, Art no. 5243, doi: 10.3390/en14175243.

[4] M. Krzaczek, "Koncepcja Bariery Termicznej w budynkach o bardzo niskim zapotrzebowaniu na energię," *Inżynieria Morska i Geotechnika,* vol. 2, pp. 154-162, 2010.

[5] M. Krzaczek and Z. Kowalczuk, "Thermal Barrier as a technique of indirect heating and cooling for residential buildings," (in English), *Energy and Buildings,* Article vol. 43, no. 4, pp. 823-837, Apr 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.12.002.

[6] M. Krzaczek and Z. Kowalczuk, "Gain Scheduling Control applied to Thermal Barrier in systems of indirect passive heating and cooling of buildings," (in English), *Control Engineering Practice,* Article vol. 20, no. 12, pp. 1325-1336, Dec 2012, doi: 10.1016/j.conengprac.2012.07.007.

[7] M. Dolezel, "Alternative way of thermal protection by thermal barrier," *Advanced Materials Research,* vol. 899, pp. 107-111, 2014

[8] D. Leciej-Pirczewska and W. Szaflik, "Wykorzystanie niskotemperaturowego czynnika w ogrzewaniu ściennym," *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja,* vol. 41, no. 5, pp. 168-172, 2010.

[9] D. Leciej-Pirczewska and W. Szaflik, "Wykorzystanie niskotemperaturowego czynnika w ogrzewaniu ściennym. Część II," *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja,* vol. 41, no. 12, pp. 455-459, 2010.

[10] E. Figiel and D. Leciej-Pirczewska, "Outer wall with thermal barrier. Impact of the barrier on heat losses and CO_2 emissions," *Przegląd Naukowy - Inżynieria i Kształtowanie Środowiska,* vol. 29, no. 2, pp. 223-233, 2020.

[11] "http://isodom.pl/isomax" (dostęp 11.09.2021).

[12] "http://www.isomax-terrasol.eu" (dostęp 11.09.2021).

[13] R. Ulbrich, G. Radlak, B. Miłaszewicz, and M. Rachel, "Badania symulacyjne stosowania bariery temperaturowej w ścianach zewnętrznych budynku," *Energia i Budynek,* vol. 10, no. 10, pp. 36-42, 2007.

[14] B. V. Stojanovic, J. N. Janevski, P. B. Mitkovic, M. B. Stojanovic, and M. G. Ignjatovic, "THERMALLY ACTIVATED BUILDING SYSTEMS IN CONTEXT OF INCREASING BUILDING ENERGY EFFICIENCY," (in English), *Thermal Science,* Article; Proceedings Paper vol. 18, no. 3, pp. 1011-1018, 2014, doi: 10.2298/tsci1403011s.

[15] M. Krajcik and O. Sikula, "The possibilities and limitations of using radiant wall cooling in new and retrofitted existing buildings," (in English), *Applied Thermal Engineering,* Article vol. 164, p. 15, Jan 2020, Art no. Unsp 114490, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114490.

[16] O. Sikula, *Software CalA User Manual (In Czech)*. Tribun, Brno, 2011.

[17] M. Krajcik, M. Arici, O. Sikula, and M. Simko, "Review of water-based wall systems: Heating, cooling, and thermal barriers," (in English), *Energy and Buildings,* Review vol. 253, p. 31, Dec 2021, Art no. 111476, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111476.

[18] Y. Yang, S. Chen, T. X. Chang, J. R. Ma, and Y. Sun, "Uncertainty and global sensitivity analysis on thermal performances of pipe-embedded building envelope in the heating season," (in English), *Energy Conversion and Management,* Article vol. 244, p. 23, Sep 2021, Art no. 114509, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114509.

[19] J. L. Xie, Q. Y. Zhu, and X. H. Xu, "An active pipe-embedded building envelope for utilizing low-grade energy sources," (in English), *Journal of Central South University,* Article vol. 19, no. 6, pp. 1663-1667, Jun 2012, doi: 10.1007/s11771-012-1190-3.

[20] C. Shen and X. T. Li, "Energy saving potential of pipe-embedded building envelope utilizing low-temperature hot water in the heating season," (in English), *Energy and Buildings,* Article vol. 138, pp. 318-331, Mar 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.064.

[21] C. Shen, X. T. Li, and S. Yan, "Numerical study on energy efficiency and economy of a pipe-embedded glass envelope directly utilizing ground-source water for heating in diverse climates," (in English), *Energy Conversion and Management,* Article vol. 150, pp. 878-889, Oct 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.04.063.

[22] X. H. Xu, S. W. Wang, J. B. Wang, and F. Xiao, "Active pipe-embedded structures in buildings for utilizing low-grade energy sources: A review," (in English), *Energy and Buildings,* Review vol. 42, no. 10, pp. 1567-1581, Oct 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.05.002.

[23] S. L. Qu, S. Su, H. Y. Li, and W. C. Hu, "Optimized control of the supply water temperature in the thermally activated building system for cold climate in China," (in English), *Sustainable Cities and Society,* Article vol. 51, p. 11, Nov 2019, Art no. 101742, doi: 10.1016/j.scs.2019.101742.

[24] J. Romani, A. de Gracia, and L. F. Cabeza, "Simulation and control of thermally activated building systems (TABS)," (in English), *Energy and Buildings,* Review vol. 127, pp. 22-42, Sep 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.05.057.

[25] Y. B. Yu, F. X. Niu, H. A. Guo, and D. Woradechjumroen, "A thermo-activated wall for load reduction and supplementary cooling with free to low-cost thermal water," (in English), *Energy,* Article vol. 99, pp. 250-265, Mar 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.01.051.

[26] F. X. Niu and Y. B. Yu, "Location and optimization analysis of capillary tube network embedded in active tuning building wall," (in English), *Energy,* Article vol. 97, pp. 36-45, Feb 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.12.094.

[27] D. Kalus, Z. Strakova, and M. Kubica, "Energy Balance of a Low Energy House with Building Structures with Active Heat Transfer Control," (in English), *Periodica Polytechnica-Mechanical Engineering,* Article vol. 65, no. 3, pp. 246-251, 2021, doi: 10.3311/PPme.17462.

[28] D. Kalús, P. Páles, L. Pelachová, Beleščák & Partneri, and L. Beleščák, "Tepelno-izolačný panel pre systémy s aktívnym riadením prechodu tepla (Heat insulating panel with active regulation of heat transition," Slovakia, 2015

[29] D. Kalus, Z. Strakova, and M. Kubica, "Parametric Study of Heating and Cooling Capacity of Interior Thermally Active Panels," (in English), *Periodica Polytechnica-Mechanical Engineering,* Article vol. 65, no. 3, pp. 269-279, 2021, doi: 10.3311/PPme.17570.

[30] D. Kalus, "Heat Insulating Panel with Active Regulation of Heat Transition," Wien, Austria, 2011.

[31] D. Kalus, V. Muckova, and D. Koudelkova, "Energy, Economic and Environmental Assessment of Thermal Barrier Application in Building Envelope Structures," (in English), *Coatings,* Article vol. 11, no. 12, p. 25, Dec 2021, Art no. 1538, doi: 10.3390/coatings11121538.

[32] D. Kalus, J. Gasparik, P. Janik, M. Kubica, and P. St'astny, "Innovative Building Technology Implemented into Facades with Active Thermal Protection," (in English), *Sustainability,* Article vol. 13, no. 8, p. 21, Apr 2021, Art no. 4438, doi: 10.3390/su13084438.

[33] D. Kalus, P. Janik, and M. Kubica, "Experimental house EB2020-Research and experimental measurements of an energy roof," (in English), *Energy and Buildings,* Article vol. 248, p. 20, Oct 2021, Art no. 111172, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111172.

[34] D. Kalus, D. Koudelkova, V. Muckova, M. Sokol, and M. Kurcova, "Contribution to the Research and Development of Innovative Building Components with Embedded Energy-Active Elements," (in English), *Coatings,* Article vol. 12, no. 7, p. 29, Jul 2022, Art no. 1021, doi: 10.3390/coatings12071021.

[35] Y. Yang and S. R. L. Chen, "Thermal insulation solutions for opaque envelope of low-energy buildings: A systematic review of methods and applications," (in English), *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* Review vol. 167, p. 26, Oct 2022, Art no. 112738, doi: 10.1016/j.rser.2022.112738.

[36] H. X. Cui and M. Overend, "A review of heat transfer characteristics of switchable insulation technologies for thermally adaptive building envelopes," (in English), *Energy and Buildings,* Review vol. 199, pp. 427-444, Sep 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.07.004.

[37] Y. F. Wu, H. X. Zhao, H. L. Sun, M. F. Duan, B. R. Lin, and S. D. Wu, "A review of the application of radiative sky cooling in buildings: Challenges and optimization," (in English), *Energy Conversion and Management,* Article vol. 265, p. 25, Aug 2022, Art no. 115768, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115768.

[38] M. Simko, M. Krajcik, O. Sikula, P. Simko, and D. Kalus, "Insulation panels for active control of heat transfer in walls operated as space heating or as a thermal barrier: Numerical simulations and experiments," (in English), *Energy and Buildings,* Article vol. 158, pp. 135-146, Jan 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.019.

[39] D. Kalus, P. Pales, and L. Pelachova, "Self-supporting heat insulating panel for the systems with active regulation of heat transition," 2011.

[40] B. Ning, S. Schiavon, and F. S. Bauman, "A Classification Scheme for Radiant Systems based on Thermal Time Constant," in *Proceedings of the 9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) and the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE)*, Tianjin, China, 2015.

[41] T. Barkanyi, "Element of building construction for active insulation of buildings," 2012.

[42] T. Barkanyi and L. Nagylucskay, "Building structure with active heat," 11.06.2009.

[43] T. Kisilewicz, M. Fedorczak-Cisak, and T. Barkanyi, "Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls," (in English), *Energy and Buildings,* Article vol. 205, p. 13, Dec 2019, Art no. Unsp 109541, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109541.

[44] T. Barkanyi, "Innowacyjne wykorzystanie energii słonecznej w celu zmniejszenia strat ciepła w budynkach," *Rynek Instalacyjny,* vol. 3, pp. 40-42, 2022.

[45] E. Iffa, D. Hun, M. Salonvaara, S. Shrestha, and M. Lapsa, "Performance evaluation of a dynamic wall integrated with active insulation and thermal energy storage systems," (in English), *Journal of Energy Storage,* Article vol. 46, p. 10, Feb 2022, Art no. 103815, doi: 10.1016/j.est.2021.103815.

[46] M. Krzaczek, J. Florczuk, and J. Tejchman, "Improved energy management technique in pipe-embedded wall heating/cooling system in residential buildings," (in English), *Applied Energy,* Article vol. 254, p. 27, Nov 2019, Art no. Unsp 113711, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113711.

[47] Q. Y. Zhu, X. H. Xu, J. J. Gao, and F. Xiao, "A semi-dynamic model of active pipe-embedded building envelope for thermal performance evaluation," (in English), *International Journal of Thermal Sciences,* Article vol. 88, pp. 170-179, Feb 2015, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.09.014.

[48] Q. Y. Zhu, A. B. Li, J. L. Xie, W. G. Li, and X. H. Xu, "Experimental validation of a semi-dynamic simplified model of active pipe-embedded building envelope," (in English), *International Journal of Thermal Sciences,* Article vol. 108, pp. 70-80, Oct 2016, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.05.004.

[49] J. L. Xie, X. H. Xu, A. B. Li, and Q. Y. Zhu, "Experimental validation of frequency-domain finite-difference model of active pipe-embedded building envelope in time domain by using Fourier series analysis," (in English), *Energy and Buildings,* Article vol. 99, pp. 177-188, Jul 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.04.043.

[50] Q. Y. Zhu, X. H. Xu, J. B. Wang, and F. Xiao, "Development of dynamic simplified thermal models of active pipe-embedded building envelopes using genetic algorithm," (in English), *International Journal of Thermal Sciences,* Article vol. 76, pp. 258-272, Feb 2014, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.09.008.

[51] M. Hongn, F. Bre, M. Valdez, and S. F. Larsen, "Two novel resistance-capacitance network models to predict the dynamic thermal behavior of active pipe-embedded structures in buildings," (in English), *Journal of Building Engineering,* Article vol. 47, p. 22, Apr 2022, Art no. 103821, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103821.

[52] L. Q. Zhou and C. J. Li, "Study on thermal and energy-saving performances of pipe-embedded wall utilizing low-grade energy," (in English), *Applied Thermal Engineering,* Article vol. 176, p. 11, Jul 2020, Art no. 115477, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115477.

[53] S. R. Chen, Y. Yang, C. Olomi, and L. Zhu, "Numerical study on the winter thermal performance and energy saving potential of thermo-activated PCM composite wall in existing buildings," (in English), *Building Simulation,* Article vol. 13, no. 2, pp. 237-256, Apr 2020, doi: 10.1007/s12273-019-0575-8.

[54] M. Ibrahim, E. Wurtz, J. Anger, and O. Ibrahim, "Experimental and numerical study on a novel low temperature facade solar thermal collector to decrease the heating demands: A south-north pipe-embedded closed-water-loop system," (in English), *Solar Energy,* Article vol. 147, pp. 22-36, May 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.02.036.

[55] O. H. Uribe, J. P. S. Martin, M. C. Garcia-Alegre, M. Santos, and D. Guinea, "Smart Building: Decision Making Architecture for Thermal Energy Management," (in English), *Sensors,* Article vol. 15, no. 11, pp. 27543-27568, Nov 2015, doi: 10.3390/s151127543.

[56] O. H. Uribe, M. Santos, M. C. Garcia-Alegre, D. Guinea, and Ieee, "A Context-Awareness Architecture for Managing Thermal Energy in an nZEB Building," (in English), *2015 Ieee First International Smart Cities Conference (Isc2),* Proceedings Paper p. 6, 2015.

[57] K. Dharmasastha, D. G. L. Samuel, S. M. S. Nagendra, and M. P. Maiya, "Experimental investigation of thermally activated glass fibre reinforced gypsum roof," (in English), *Energy and Buildings,* Article vol. 228, p. 14, Dec 2020, Art no. 110424, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110424.
[58] J. Romani, G. Perez, and A. de Gracia, "Experimental evaluation of a cooling radiant wall coupled to a ground heat exchanger," (in English), *Energy and Buildings,* Article vol. 129, pp. 484-490, Oct 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.08.028.
[59] J. Romani, G. Perez, and A. de Gracia, "Experimental evaluation of a heating radiant wall coupled to a ground source heat pump," (in English), *Renewable Energy,* Article vol. 105, pp. 520-529, May 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.12.087.
[60] J. Romani, L. F. Cabeza, and A. de Gracia, "Development and experimental validation of a transient 2D numeric model for radiant walls," (in English), *Renewable Energy,* Article vol. 115, pp. 859-870, Jan 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.08.019.
[61] Z. Nagórski, *Modelowanie przepływu ciepła metodą KM3R: MBE+EXCEL=KM3R*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2014.
[62] J. Szargut, *Modelowanie numeryczne pól temperatury*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1992.
[63] E. Kostowski, *Przepływ ciepła*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2000.
[64] S. Wiśniewski and T. S. Wiśniewski, *Wymiana ciepła*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2009.
[65] "https://www.udel.edu" (dostęp 4.10.2018).
[66] "Badanie gęstości oraz parametrów cieplnych próbek betonowych," Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Wydział Budownictwa i Architektury. Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych 2019.
[67] *Komponenty budowlane i elementy budynku - Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła - Metoda obliczania PN-EN ISO 6946:1999*, 1999.
[68] "https://termoorganika.pl" (dostęp 9.02.2022).
[69] D. Kaczorek and H. Koczyk, *Ogrzewanie płaszczyzn na otwartej przestrzeni-modelowanie i analiza eksploatacyjna*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2013.
[70] *Materiały i wyroby budowlane - Właściwości cieplno-wilgotnościowe - Stabelaryzowane wartości obliczeniowe PN-EN 12524*, 2003.
[71] C. Oleśkowicz-Popiel and J. Wojtkowiak, *Eksperymenty w wymianie ciepła*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2007.
[72] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, 2007.
[73] A. P. Weber, *Centralne ogrzewania wodne: obliczanie i konstrukcja*. Warszawa: Arkady, 1975.
[74] *Czujniki platynowe przemysłowych termometrów rezystancyjnych i platynowe czujniki temperatury PN-EN 60751:2009*, 2009
[75] "TRNSYS 17 Documentation"
[76] "https://sel.me.wisc.edu" (dostęp 21.10.2022).
[77] H. Recknagel, E. Sprenger, and E.-R. Schramek, *Kompendium ogrzewnictwa i klimatyzacji: łącznie z zagadnieniami przygotowania ciepłej wody i techniki chłodniczej*. Wrocław: Omni Scala, 2008.