



**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**

**Streszczenie rozprawy doktorskiej**

Promotor:

prof. dr hab. inż. Halina KOCZYK

Poznań, 2022

## Spis treści streszczenia rozprawy doktorskiej

Streszczenie .....	2
1. Wstęp .....	3
1.1. Wprowadzenie .....	3
2. Podstawowe tezy pracy, jej cel i zakres .....	3
3. Aktualny stan badań na temat przegród aktywowanych termicznie .....	4
4. Model ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie .....	4
5. Badania eksperymentalne .....	5
6. Porównanie modelu numerycznego z badaniami doświadczalnymi .....	5
7. Symulacja stanów eksploatacyjnych systemu opartego na ścianie zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie w programie TRNSYS .....	6
8. Przegroda aktywowana termicznie a komfort cieplny .....	6
9. Podsumowanie .....	7
9.1. Wnioski końcowe .....	7

## 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. Pomiarów 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.

## 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 przyspieszeniu 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.

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 termicznie. Przegrody aktywowane termicznie mogą współpracować z własnym magazynem energii lub być zasilane pompą ciepła, np. w połączeniu z panelami fotowoltaicznymi.

## 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<sup>2</sup>·K/W, 0,07 m<sup>2</sup>·K/W, 0,09 m<sup>2</sup>·K/W, 0,11 m<sup>2</sup>·K/W i 0,13 m<sup>2</sup>·K/W oraz opory cieplne warstwy izolacyjnej wynoszące 2,58 m<sup>2</sup>·K/W, 2,60 m<sup>2</sup>·K/W, 2,89 m<sup>2</sup>·K/W, 3,23 m<sup>2</sup>·K/W, 3,25 m<sup>2</sup>·K/W, 3,55 m<sup>2</sup>·K/W, 3,71 m<sup>2</sup>·K/W, 3,87 m<sup>2</sup>·K/W, 4,19 m<sup>2</sup>·K/W, 4,33 m<sup>2</sup>·K/W, 4,52 m<sup>2</sup>·K/W i 4,84 m<sup>2</sup>·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**

Przedstawiono aktualny stan badań na temat przegród aktywowanych termicznie, koncentrując się na wynikach modelowania i pomiarach eksperymentalnych w obiektach i komorach klimatycznych oraz wynikach badań doświadczalnych przegród aktywowanych termicznie.

### **4. Model ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie**

W ramach rozprawy doktorskiej wykonano model ściany zewnętrznej z elementem aktywowanym termicznie metodą bilansów elementarnych MBE.

Zaprezentowano wyniki obliczeń modelu numerycznego dla 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 codziennym zapisem. Warunki początkowe przyjęto z badań scharakteryzowanych w kolejnym rozdziale 5.

## 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 opomiarowane 88 czujnikami podłączonymi do rejestratorów.

Przedstawiono wyniki pomiarów temperatury na powierzchni betonu pod warstwą styropianu w celu zobrazowania reakcji przegrody na poszczególne etapy 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 (na powierzchni betonu od strony przestrzeni powietrznej wewnętrznej) oraz 20 czujników B\_Z (na powierzchni betonu od strony przestrzeni powietrznej zewnętrznej) dodatkowo w niektórych punktach pomiarowych temperatura osiągnęła zbliżoną wartość. W związku z 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.

## 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.

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.

Analizie poddano budynek 1 kondygnacyjny składający się z 11 pomieszczeń o łącznej powierzchni 106 m<sup>2</sup> z dachem płaskim z wentylacją mechaniczną nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła na poziomie 85%.

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 przeanalizowano 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.

## **8. Przegroda aktywowana termicznie a komfort cieplny**

Program TRNSYS posłużył również do analizy komfortu cieplnego wykorzystując wskaźniki PMV (ocena odczucia) oraz PPD (przewidywany procent osób niezadowolonych).

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 grubości betonu: 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm oraz 30 cm o oporach cieplnych warstwy konstrukcyjnej równych: 0,04 m<sup>2</sup>·K/W, 0,07 m<sup>2</sup>·K/W, 0,09 m<sup>2</sup>·K/W, 0,11 m<sup>2</sup>·K/W i 0,13 m<sup>2</sup>·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<sup>2</sup>·K/W, 3,23 m<sup>2</sup>·K/W, 3,55 m<sup>2</sup>·K/W, 3,87 m<sup>2</sup>·K/W,

4,19 m<sup>2</sup>·K/W, 4,52 m<sup>2</sup>·K/W i 4,84 m<sup>2</sup>·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<sup>2</sup>·K/W, 2,89 m<sup>2</sup>·K/W, 3,25 m<sup>2</sup>·K/W, 3,71 m<sup>2</sup>·K/W, 4,19 m<sup>2</sup>·K/W i 4,33 m<sup>2</sup>·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.

## 9. Podsumowanie

### 9.1. Wnioski końcowe

W rozdziale 1 rozprawy doktorskiej 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 rozprawy doktorskiej. W pracy 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 rozprawy 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 rozprawy 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 rozprawy doktorskiej 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 zdecydowała 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 rozprawy doktorskiej, 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 najbliższej osi symetrii wewnątrz betonowej przegrody (P13 i P14) uwzględniając wszystkie badane temperatury zasilania pętli wartości zawierały się w przedziale:  $0,00^{\circ}\text{C} - 0,16^{\circ}\text{C}$  (dla etapu stabilizacji – podrozdział 6.1),  $0,00^{\circ}\text{C} - 0,05^{\circ}\text{C}$  (dla etapu przebiegu – podrozdział 6.2) i  $0,00^{\circ}\text{C} - 0,08^{\circ}\text{C}$  (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:  $0,07^{\circ}\text{C}$ ,  $0,24^{\circ}\text{C}$  oraz  $0,09^{\circ}\text{C}$  (dla etapu stabilizacji – podrozdział 6.1),  $0,08^{\circ}\text{C}$ ,  $0,55^{\circ}\text{C}$  oraz  $0,04^{\circ}\text{C}$  (dla etapu przebiegu – podrozdział 6.2) i  $0,08^{\circ}\text{C}$ ,  $1,04^{\circ}\text{C}$  oraz  $0,07^{\circ}\text{C}$  (dla etapu wymuszenia – podrozdział 6.3). Wynika z tego, że uzyskane rezultaty drogą numeryczną i doświadczalną są do siebie zbliżone.

W rozdziałach 7 i 8 rozprawy doktorskiej wykorzystano program TRNSYS do analizy zużycia energii oraz komfortu cieplnego dla budynku 1 kondygnacyjnego z płaskim dachem o powierzchni  $106\text{ m}^2$  (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. Przystudiuwano warianty z temperaturą zasilania elementu aktywowanego termicznie równą:  $16^{\circ}\text{C}$ ,  $18^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$  i  $22^{\circ}\text{C}$  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  $0,031\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) (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:  $0,04\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,  $0,07\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,  $0,09\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,  $0,11\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  i  $0,13\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  (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  $0,031\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , czyli opory cieplne warstwy izolacyjnej wyniosły:  $2,58\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,  $3,23\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,  $3,55\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,  $3,87\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,  $4,19\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,  $4,52\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  i  $4,84\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  (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:  $0,030\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $0,031\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $0,035\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $0,040\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $0,045\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  i  $0,050\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , zatem o oporze cieplnym warstwy izolacyjnej na poziomie:  $2,60\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,  $2,89\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,  $3,25\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,  $3,71\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,  $4,19\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  i  $4,33\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  (podrozdział 7.2.4 i 8.2.4).

W rozdziale 7 rozprawy 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:  $16^{\circ}\text{C}$  latem i  $22^{\circ}\text{C}$  zimą na poziomie: 15,93% (lato) i 40,35% (zima).

Rezultaty osiągnięte w kwestii komfortu cieplnego omówione w rozdziale 8 rozprawy 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.