POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

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

mgr inż. Joanna SINACKA

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE SUFITÓW GRZEWCZO-CHŁODZĄCYCH Z WYPEŁNIENIEM MATERIAŁEM ZMIENNOFAZOWYM

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Promotor: prof. dr hab. inż. Edward SZCZECHOWIAK

Promotor pomocniczy: dr inż. Radosław GÓRZEŃSKI

Poznań, 2021

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Zapewnienie komfortu cieplnego i jakości powietrza jest kluczowym zadaniem dla produktywności i bezpieczeństwa pracy ludzi przebywających w pomieszczeniach, w tym również biurowych i administracyjnych. Wiąże się to z potrzebą zastosowania systemów klimatyzacyjnych, których zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia oraz napędu urządzeń pomocniczych, bezpośrednio wpływa na koszty eksploatacyjne budynku. Rozwój budownictwa energooszczędnego skłania do badań nad rozwiązaniami układów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC) dla tego typu budynków.

Rosnące szczytowe zapotrzebowanie na moc implikuje wzrost znaczenia akumulacji energii na sposób ciepła i chłodu. Technologie, które efektywnie magazynują ciepło i chłód, są również istotne w kontekście zwiększenia udziału niekonwencjonalnych źródeł energii i poprawy wydajności systemów HVAC. Znanym i stosowanym energooszczędnym rozwiązaniem o dużej pojemności cieplnej są stropy aktywowane termicznie. Jednak, z uwagi na zintegrowanie elementów grzewczo-chłodzących z konstrukcją budynku, rozwiązanie to można stosować głównie w budynkach nowobudowanych i musi zostać przewidziane na etapie projektu. Alternatywę stanowią systemy podwieszanych sufitów grzewczo-chłodzących z wypełnieniem materiałem zmiennofazowym (PCM), które pozwalają na uzyskanie wysokiej pojemności cieplnej (przy mniejszej masie), zachowując jednocześnie właściwości samoregulacyjne. Z uwagi na sposób i miejsce montażu panele grzewczo-chłodzące mogą być instalowane również w istniejących już budynkach.

Systemy o dużej pojemności cieplnej wymagają odpowiedniego dostosowania do obciążania chłodniczego pomieszczenia, co obliguje do przeprowadzenia szerszej analizy w stanach dynamicznych. Poznanie zachowania systemu w warunkach dynamicznych jest konieczne do określenia jego mocy szczytowej, zapotrzebowania na energię do chłodzenia i ogrzewania oraz sposobu sterowania dla zapewnienia adaptacyjnego komfortu cieplnego.

Podsumowanie

Połączenie energooszczędnego systemu chłodzenia (sufit chłodzący) i kompaktowego magazynu energii (PCM) to obiecująca i innowacyjna technologia chłodzenia, jednak nadal brakuje wiarygodnych badań eksperymentalnych i numerycznych dotyczących mocy chłodniczej, efektywności energetycznej, mocy szczytowej, sposobu sterowania, czy niezawodności pracy systemu, jak również jego wpływu na komfort cieplny człowieka. Dużo więcej wyników badań jest dostępnych dla systemu stropów aktywowanych termicznie, którego pojemność cieplna wynika wyłącznie z masy konstrukcji (nie wykorzystuje ciepła przemiany fazowej). Zastosowanie PCM pozwala na znaczące zmniejszenie grubości materiału akumulującego energię, przy jednoczesnym utrzymaniu takiej samej pojemności cieplnej. Sufit aktywowany termicznie wypełniony PCM ze względu na łatwość montażu, lokalizację rdzenia aktywnego termicznie na powierzchni paneli grzewczo-chłodzących oraz dużą pojemność cieplną w zakresie temperatury pracy systemu daje większą elastyczność i możliwość dostosowywania do zmiennych warunków projektowych. Pozwala na lepszą regulację

i wykorzystanie tańszej energii elektrycznej dostępnej w godzinach nocnych. Rozwój tej technologii jest szczególnie istotny dla budynków o konstrukcji lekkiej oraz w kontekście termomodernizacji lub przebudowy istniejących już budynków. Wysoka cena PCM i niepełne poznanie zachowania systemu dla różnych warunków brzegowych skutkują niewielką dostępnością na rynku. W celu zwiększenia ich dostępności niezbędne jest przede wszystkim poznanie pracy systemów sufitów aktywowanych termicznie współpracujących z materiałem zmiennofazowym w warunkach dynamicznych oraz rozwój badań z zakresu PCM.

1.2. Cel, zakres i teza rozprawy doktorskiej

Cel pracy

Celem pracy jest stworzenie i walidacja eksperymentalna modelu numerycznego opisującego zachowanie wodnych paneli sufitowych grzewczo-chłodzących z wypełnieniem materiałem zmiennofazowym (PCM) oraz bez wypełnienia PCM w warunkach dynamicznych dla określonego przedziału czasu. Model będzie uwzględniał charakterystykę cieplną oraz profil użytkowania pomieszczeń, umożliwiając identyfikację właściwości cieplnych systemu oraz określenie zasad budowy algorytmu sterowania zapewniającego jak najniższe zużycie energii do chłodzenia (ogrzewania) pomieszczeń, przy jednoczesnym zachowaniu akceptowalnego komfortu cieplnego.

Zakres pracy

Rozprawa swoim zakresem obejmuje:

1) przegląd i analizę stanu wiedzy w zakresie:
   - komfortu cieplnego (zwłaszcza adaptacyjnego) w budynkach biurowych i administracyjnych – przy zastosowaniu stropów lub sufitów grzewczo-chłodzących,
   - płaszczyznowych systemów grzewczo-chłodzących współpracujących z PCM
   - modelowania przepływu ciepła w pomieszczeniach z sufitami grzewczo-chłodzącymi wypełnionymi PCM,
2) badania doświadczalne systemu podwieszanego sufitu grzewczo-chłodzącego z wypełnieniem materiałem zmiennofazowym (PCM), przeprowadzone w komorze doświadczalnej,
3) model numeryczny opisujący dynamiczne oddziaływania systemu podwieszanego sufitu grzewczo-chłodzącego z i bez wypełnienia materiałem zmiennofazowym na komfort cieplny oraz walidację eksperymentalną modelu,
4) przeprowadzenie symulacji komputerowych dla wybranych modeli użytkowych przy wykorzystaniu skryptu, który opracowano w języku programowania Python, a następnie przeprowadzenie analizy wyników,
5) analizę zasad sterowania systemem, mając na celu zapewnienie komfortu cieplnego w godzinach pracy oraz minimalizację kosztów eksploatacji.

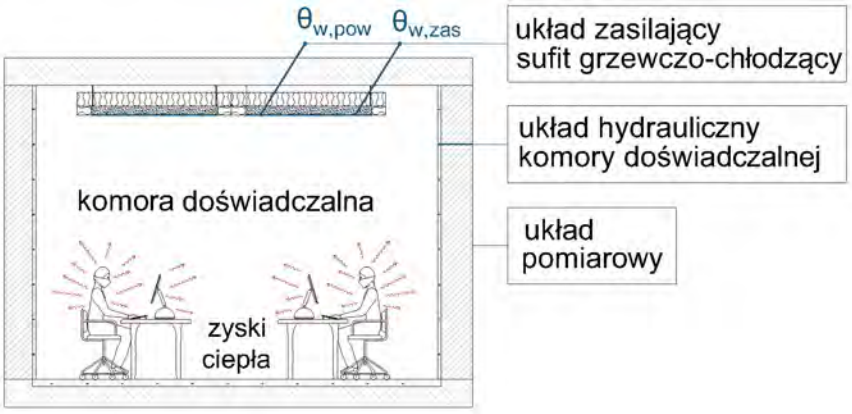
Teza

Zastosowanie materiału zmiennofazowego zwiększa pojemność cieplną sufitów grzewczo-chłodzących i w ten sposób uzyskiwane są właściwości podobne do stropów aktywowanych termicznie. Wpływa to na lepszą współpracę z odnawialnymi niskotemperaturowymi źródłami energii, a poprzez zastosowanie modelu adaptacyjnego komfortu cieplnego oraz dostosowanie algorytmów sterowania obniża moc szczytową i koszty eksploatacyjne.

2. Badania doświadczalne systemu podwieszanego sufitu grzewczo-chłodzącego z PCM

2.1. Struktura i opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze składało się z układu hydraulicznego zasilającego sufit chłodzący, układu hydraulicznego komory doświadczalnej oraz układu pomiarowego przetwarzającego i zbierającego dane, niezależnych od siebie. Symulacja zysków ciepła realizowana była żarówkami LED podłączonymi do elektronicznego programatora czasowego (rys. 2).



Rys. 2. Struktura stanowiska badawczego

Badania doświadczalne sufitu chłodzącego przeprowadzono w celu poznania dynamicznych reakcji zależnych od:

- profilu pracy użytkowników i wysokości obciążenia chłodniczego (zysków ciepła),
- strumienia masy wody i temperatury wody na zasilaniu,
- początkowej temperatury w pomieszczeniu,
- temperatury przegród budowlanych.

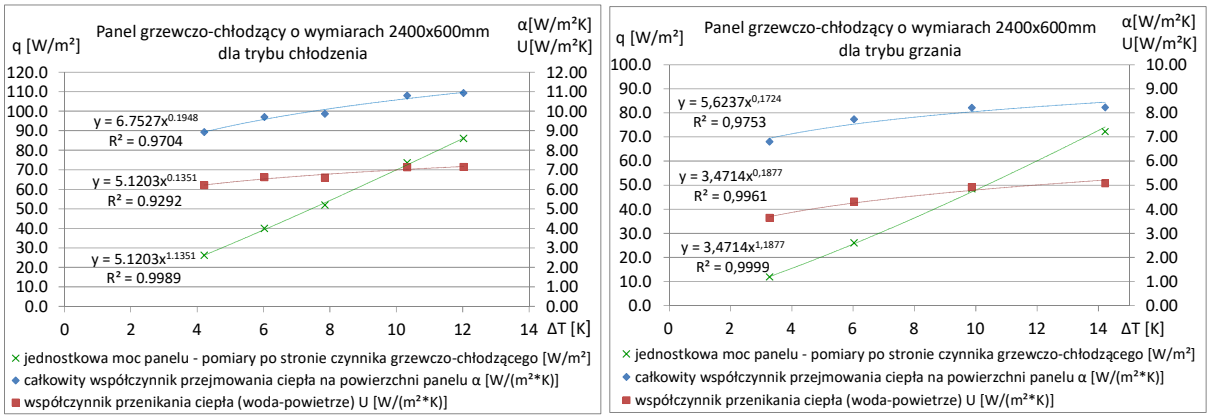
Parametry, których reakcje dynamiczne poddano badaniom to:

- temperatura powierzchni paneli grzewczo-chłodzących,
- temperatura powietrza w komorze doświadczalnej,
- temperatura materiału zmiennofazowego wypełniającego panele grzewczo-chłodzące,
- wilgotność względna i prędkość powietrza w komorze doświadczalnej, temperatura promieniowania (parametry kontrolne odpowiedzialne za odczucie komfortu cieplnego).

2.2. Opis cykli badawczych i prezentacja wyników badań

Badania panelu grzewczo-chłodzącego bez PCM – w stanach ustalonych

Badania w stanach ustalonych obejmowały tryb grzania i chłodzenia panelu aktywowanego termicznie bez wypełnienia PCM. W trybie grzania temperatura w pomieszczeniu utrzymywana była na poziomie 20°C, a w trybie chłodzenia na poziomie 29,2°C. Celem było określenie parametrów eksploatacyjnych. Na rysunku 3 przedstawiono jednostkową moc chłodniczą, współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni panelu oraz współczynnik przenikania ciepła pomiędzy czynnikiem grzewczo-chłodzącym (wodą) a pomieszczeniem w funkcji różnicy temperatury otoczenia i średniej temperatury wody.

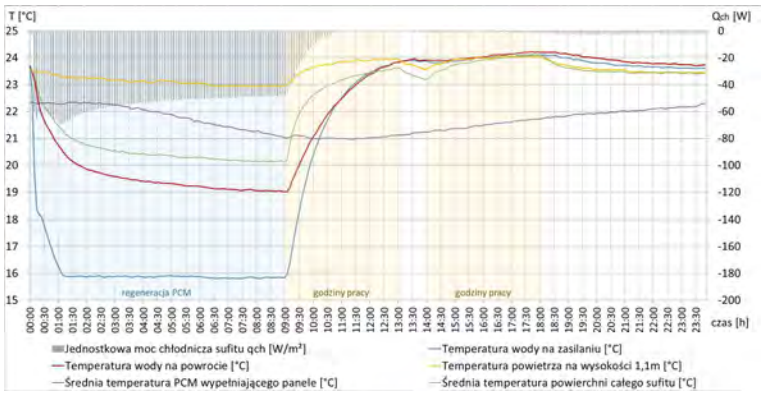


Rys. 3. Wyniki badań panelu grzewczo-chłodzącego dla trybu chłodzenia (po lewej) i trybu grzania (po prawej)

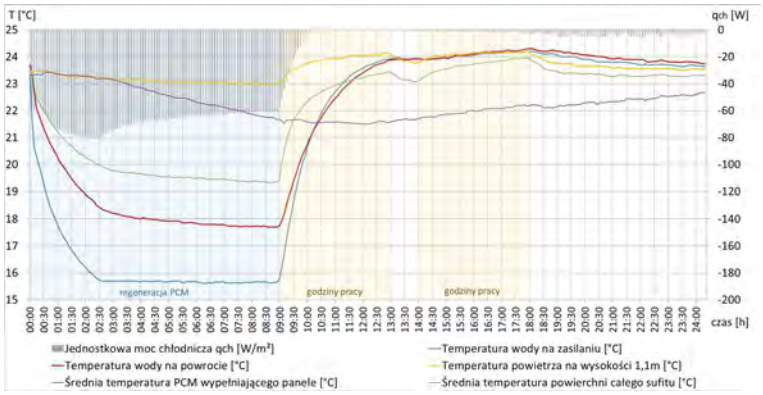
Badania sufitu aktywowanego termicznie z wypełnieniem PCM – w stanach dynamicznych

Badania w stanach dynamicznych paneli aktywowanych termicznie z wypełnieniem PCM, które uwzględniają symulację obciążenia chłodniczego, przeprowadzono dla cykli dobowych dla temperatury aktywacji przegród komory utrzymywanej na poziomie 24°C. Analizowano profil użytkowania charakterystyczny dla pomieszczenia biurowego, w którym praca odbywa się przez 8 godzin (bez przerwy lunchowej) lub w trybie 9 godzin pracy z godzinową przerwą lunchową pomiędzy czwartą a piątą godziną pracy oraz dla pomieszczenia dydaktycznego, w którym co 1,5 h występują przerwy 10-, 15- lub 30-minutowe. Symulowane wewnętrzne zyski ciepła były na poziomie 220 W. W zależności od profilu użytkowania zadano różne czasy aktywacji systemu: dla biura z ciągłą pracą wynosił 8 h, dla biura z przerwą lunchową 9 h lub 8 h 30 min., a dla pomieszczenia dydaktycznego 10 h 20 min. Badania sufitu aktywowanego termicznie z wypełnieniem PCM, przeprowadzone w stanach dynamicznych, posłużyły do walidacji modelu numerycznego.

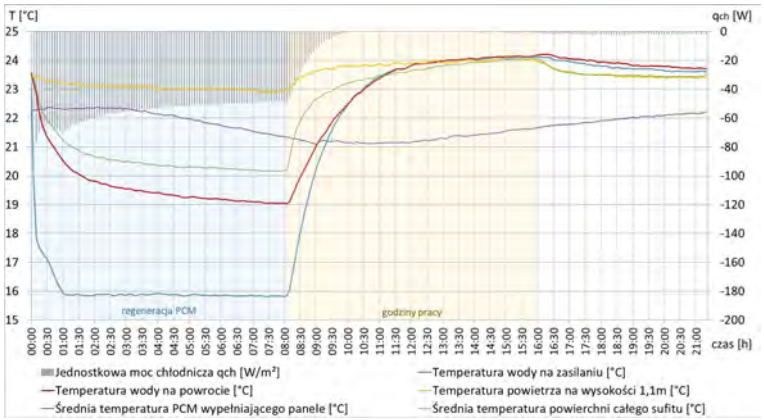
Na rysunkach 4-7 przedstawiono wybrane dobowe zmiany temperatury powietrza, średniej temperatury powierzchni sufitu aktywowanego termicznie, średniej temperatury materiału zmiennofazowego wypełniającego panele grzewczo-chłodzące, temperatury wody na powrocie oraz jednostkową moc chłodniczą, zależne od temperatury wody na zasilaniu sufitu chłodzącego (T_{wz}), strumienia masy wody podczas regeneracji ($\dot{m}$) i profilu użytkowania.



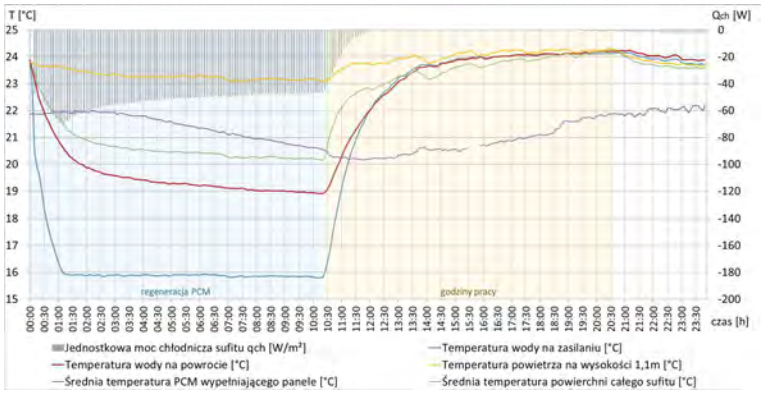
Rys. 4. Wyniki badań sufitu chłodzącego w pomieszczeniu biurowym (4 h+4 h): T_{wz}= 15,9°C, $\dot{m}$=10,4 g/s



Rys. 5. Wyniki badań sufitu chłodzącego w pomieszczeniu biurowym (4 h+4 h): T_{wz}= 15,6°C, $\dot{m}$=20,3 g/s



Rys. 6. Wyniki badań sufitu chłodzącego w pomieszczeniu biurowym (8 h): T_{wz}= 15,9°C, $\dot{m}$=10,4 g/s



Rys. 7. Wyniki badań sufitu chłodzącego w pomieszczeniu dydaktycznym: T_{wz}= 15,9°C, $\dot{m}$=10,4 g/s

2.3. Wnioski z przeprowadzonych badań

Całkowity współczynnik przejmowania ciepła dla panelu aktywowanego termicznie obliczony na postawie badań w stanach ustalonych w trybie chłodzenia był w zakresie 9-11 W/(m^{2}K), a w trybie grzania 6,8-8,2 W/(m^{2}K). Współczynnik przenikania ciepła odpowiednio dla trybu chłodzenia wynosił 6-7 W/(m^{2}K), a dla trybu grzania 3,7-5 W/(m^{2}K). Uzyskana jednostkowa moc chłodnicza to 27-87 W/m^2, a jednostkowa moc grzewcza to 12-72 W/m^2.

Z badań sufitu grzewczo-chłodzącego wypełnionego krzemionką nasączoną parafiną (PX21 firmy Rubitherm) przeprowadzonych w warunkach dynamicznych wynika, że jest możliwe przeniesienie aktywacji sufitu poza godziny przebywania ludzi (godziny nocne/poranne), utrzymując komfort cieplny w godzinach użytkowania pomieszczenia.

Wewnętrzne źródła ciepła (220 W) włączone bezpośrednio po wyłączeniu obiegu wody chłodzącej spowodowały wzrost temperatury powietrza w komorze o 1 K (z 23°C na 24°). Dla każdego profilu użytkowania, po około dwóch godzinach od włączenia źródeł ciepła aż do ich wyłączenia, obserwowany jest niewielki wzrost temperatury w pomieszczeniu, co oznacza, że materiał zmiennofazowy wpływa na stabilizację warunków cieplnych.

Strumień masy wody ma wpływ na różnicę temperatury wody pomiędzy zasilaniem a powrotem. Dla strumienia masy równego 20,3 g/s różnica temperatury spada do 2 K na koniec fazy regeneracji, natomiast dla 10,4 g/s spada do 3 K.

Amplituda temperatury materiału zmiennofazowego wypełniającego panele grzewczo-chłodzące podczas cyklu dobowego dla pomieszczenia biurowego wynosiła średnio 1,2 K, a dla pomieszczenia dydaktycznego około 2 K. Wpływ na to miał różny czas regeneracji. Najdłuższy był zadany dla profilu użytkowania pomieszczenia dydaktycznego = 10 h 20 min.).

Na otrzymane wyniki (wartości bezwzględne) znaczący wpływ miała zadana temperatura aktywacji przegród komory doświadczalnej, dlatego istotne są warunki bezpośrednio przed godzinami, w których będą przebywać użytkownicy.

Małe różnice między temperaturą powietrza w pomieszczeniu a temperaturą powierzchni sufitu w godzinach przebywania ludzi, pozwalają na wysoki poziom samoregulacji układu.

Podczas aktywacji sufitu temperatura powietrza w pomieszczeniu oraz temperatura powierzchni sufitu ulegają zmianie. Wpływ jest obserwowany bezpośrednio po włączeniu pompy obiegowej, co oznacza że system posiada możliwość szybkiej zmiany warunków w pomieszczeniu również w czasie wystąpienia nadwyżki zysków ciepła (utrzymana została własność paneli bez wypełnienia PCM).

3. Walidacja modelu numerycznego opisującego przepływ ciepła w pomieszczeniu z podwieszanym sufitem grzewczo-chłodzącym wypełnionym PCM

3.1. Budowa modelu numerycznego i metoda rozwiązania

Do analizy zagadnienia wybrano metodę różnic skończonych, która często stosowana jest do rozwiązywania zagadnień wymiany ciepła. Problem badawczy rozwiązano w schemacie niejawnym. Na wybór wpływ miała bezwarunkowa stabilność metody niejawnej oraz stosunkowo krótki czas wykonania procedur obliczeniowych, pomimo złożoności modelu. Dla sufitu grzewczo-chłodzącego z wypełnieniem PCM oraz bez wypełnienia opracowano model dwuwymiarowy. Przewodzenie ciepła w przegrodach uproszczono do zagadnienia jednowymiarowego. Wymianę ciepła pomiędzy sufitem aktywowanym termicznie z i bez wypełnienia PCM a pomieszczeniem opisano stosując sieć strumieni ciepła uwzględniającą podział na radiacyjną i konwekcyjną drogę przekazywania energii (rys. 8). W celu przeprowadzenia walidacji konieczne było opracowanie modelu numerycznego oddającego parametry i warunki komory klimatycznej, w której wykonano badania eksperymentalne.

Warunki jednoznaczności rozwiązania

1) Warunki geometryczne:
   Do modelu wprowadzono pomieszczenie w kształcie prostopadłościanu o wymiarach komory doświadczalnej oraz panele grzewczo-chłodzące o długości 1200 mm i 2400 mm;

2) Warunki fizyczne:
   Każdy materiał z jakiego wykonano przegrody komory oraz panele grzewczo-chłodzące (warstwy) opisany został właściwościami fizycznymi (stałe lub zależne od temperatury);

3) Rozkład wydajności wewnętrznych źródeł ciepła w czasie:
   Zaproponowano 3 profile użytkowania pomieszczenia, które wprowadzono do modelu w funkcji szybkiego wyboru:
   - 8 godzin pracy (bez przerwy) w pomieszczeniu biurowym,
   - 9 godzin pracy z przerwą 60-minutwą,
   - pomieszczenie dydaktyczne, w którym co 1,5 h występują przerwy 30-, 15- lub 10-minutowe;

4) Warunek początkowy (Cauchy'ego):
   Jednorodny rozkład temperatury panelu grzewczo-chłodzącego (PCM/powietrze, rurki, obudowa), wody (czynnik grzewczo-chłodzący), powietrza w pomieszczeniu oraz przegród: $T(x, y, \tau)_{\tau=0} = T_{otoczenia}(x, y)$;

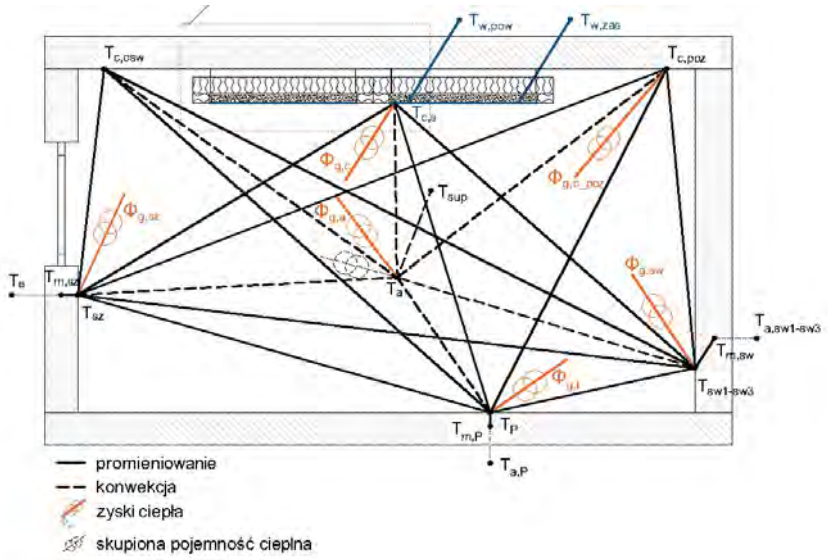
5) Warunki brzegowe związane z pomieszczeniem:
   - I rodzaju (Dirichleta: $T(x, y, \tau)_A = T_A(x_A, y_A, \tau)$); $T_{ośw}$=35-40°C, T_{poz}=24°C, 26°C
   - II rodzaju (Neumanna) – gęstości strumieni ciepła:
     całkowite zyski ciepła (konwekcyjne + radiacyjne): 220 W;

– III rodzaju (Fouriera) – temperatura płynu: woda w przegrodach komory: 24°C, 26°C (dla warunków rzeczywistych: temperatura powietrza zewnętrznego i sąsiednich pomieszczeń);

6) Warunki brzegowe dla panelu grzewczo-chłodzącego wypełnionego PCM:
   – powierzchnia styku panelu z izolacją (qi=0 W/m²): specyficzny przypadek warunku brzegowego II rodzaju (Neumanna): izolowana powierzchnia,
   – dolna ścianka zewnętrzna panelu:
     • $q_s = \alpha_k \cdot (T_{air} - T_s) + \sum_0^i \alpha_{r,i} \cdot (T_{r,i} - T_s) + q_{zyski(r)}$,
     • temperatura powietrza w pomieszczeniu T_{air} (bilans cieplny powietrza w pomieszczeniu),
     • jednostkowe zyski ciepła przekazywane na drodze promieniowania, $q_{zyski\ (r)}$,
     • temperatura powierzchni wewnętrznej i-tej przegrody otaczającej panele grzewczo-chłodzące, $T_{r,i}$,
   – ścianki rur miedzianych z czynnikiem grzewczo-chłodzącym:
     • $q_w = \alpha_w \cdot [T_{miedź}(x) - T_w(x)]$,
     • temperatura czynnika grzewczo-chłodzącego zależna od temperatury na zasilaniu (15°C, 17°C); wyprowadzone równanie na temperaturę wody (zależne od odległości od początku wężownicy w panelu),
     • jednolita, prostokątna siatka w całym przekroju rurki, którą płynie czynnik grzewczo-chłodzący o stałej temperaturze wynikającej z średniej temperatury wody w przekroju.

Układ sufit grzewczo-chłodzący z wypełnieniem PCM - pomieszczenie

Założenia :
– skupiona temperatura powietrza wewnętrznego,
– pominięcie pojemności cieplnej elementów wyposażenia pomieszczenia,
– symulacja komory doświadczalnej: płaszczyzny adiabatyczne w ścianach i stropie znajdują się w warstwie rurek kapilarnych, a w podłodze w warstwie rur zatopionych w jastrychu betonowym
– brak wydzielenia okna w bilansie cieplnym,
– prędkość powietrza w pomieszczeniu nie przekracza 0,1 m/s.

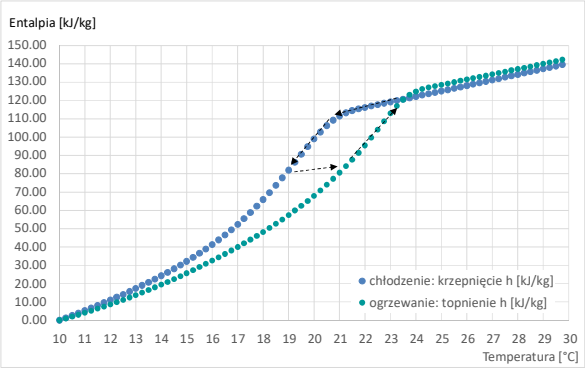


Rys. 8. Sieć strumieni ciepła – model

Układ sufit grzewczo-chłodzący – materiał zmiennofazowy

Założenia modelu:

- górna i boczne krawędzie paneli są adiabatyczne (10 cm EPS),
- model 2D, siatka kwadratowa ($\Delta x = \Delta y = d$),
- współczynniki przewodzenia ciepła wszystkich materiałów są stałe (λ=const),
- wewnętrzne zyski ciepła jawnego przekazywane na drodze promieniowania: 50%,
- entalpia i ciepło właściwe materiału zmiennofazowego c_{PCM} ($c_{x,y}$) zależne są od temperatury oraz kierunku przemiany fazowej (rys. 9).



Rys. 9. Obszar pracy dla badanego układu z PX21

Znajomość charakterystyki PX21 była niezbędna do zamodelowania układu uwzględniającego przemianę fazową materiału wypełniającego panele grzewczo-chłodzące. Na podstawie badań eksperymentalnych wyznaczono równanie zależności ciepła właściwego od temperatury:

$$c_p(T) = a_1 \cdot T^6 + a_2 \cdot T^5 + a_3 \cdot T^4 + a_4 \cdot T^3 + a_5 \cdot T^2 + a_6 \cdot T + a_7. \quad \left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right] \tag{1}$$

Tabela 1. Stałe w równaniu (1) dla procesu krzepnięcia i topnienia materiału PX21

	Proces krzepnięcia (podczas chłodzenia):			Proces topnienia (podczas ogrzewania):		
Zakres temp.	⟨5, 20) °C	⟨20, 22⟩ °C	(22, 40⟩ °C	(6, 23) °C	⟨23, 25⟩ °C	(25, 50⟩ °C
a_1	$-5 \cdot 10^{-5}$	0	$3 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	0	$2 \cdot 10^{-7}$
a_2	0,0037	0	−0,0006	0,0015	0	$-5 \cdot 10^{-5}$
a_3	−0,1025	0	0,0498	−0,0506	0	0,0048
a_4	1,4547	0	−2,1178	0,8762	0	−0,2428
a_5	−11,127	−0,3656	50,323	−8,1286	0,9434	6,8033
a_6	43,538	8,9439	−632,85	38,522	−52,418	−100,71
a_7	−63,897	−16,105	3292,7	−70,176	723,84	617,95

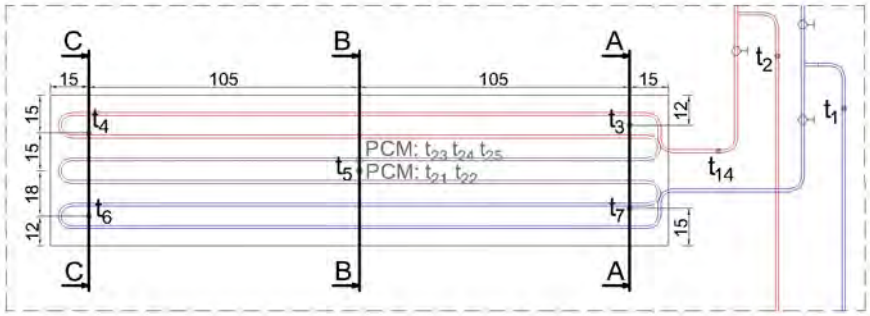
Temperatura czynnika grzewczo-chłodzącego (woda) przepływającego przez panel grzewczo-chłodzący

Równania opisujące wymianę ciepła dla przekroju przez panel (2D) są powiązane z równaniem opisującym temperaturę czynnika grzewczo-chłodzącego za pomocą równania przejmowania ciepła na ściankach rur miedzianych, w których realizowany jest przepływ czynnika grzewczo-chłodzącego (woda). Z bilansu otrzymywana jest zależność:

$$\alpha_{\mathrm{w}} \cdot \pi \cdot d_{\mathrm{w}} \cdot \Delta x_x \cdot \left(T_{\mathrm{m,sr(x)}} - T_{\mathrm{w,sr}(x)}\right) = \dot{\mathrm{m}} \cdot c_{pw} \cdot \left(T_{\mathrm{w(x)}} - T_{\mathrm{w(x-1)}}\right). \tag{2}$$

Różnica temperatury wody w panelu pomiędzy zasilaniem a powrotem jest w zakresie 2-4°C, dlatego możliwe jest przyjęcie średniego współczynnika przejmowania ciepła pomiędzy wodą a powierzchnią rurki miedzianej na całej długości rdzenia aktywowanego termicznie, zależnego od liczby Reynoldsa (charakteru przepływu) i obliczanego na podstawie otrzymanej liczby Nusselta, charakteryzującej przejmowanie ciepła.

W celu wyznaczenia przekroju pozwalającego na obliczenie średniej temperatury powierzchni panelu grzewczo-chłodzącego wykonano symulacje dla wybranych przekrojów: A-A, B-B i C-C (rys. 10) i porównano ze zdjęciami termograficznymi oraz pomiarami temperatury powierzchni paneli. Do dalszych obliczeń numerycznych przyjęto przekrój B-B.

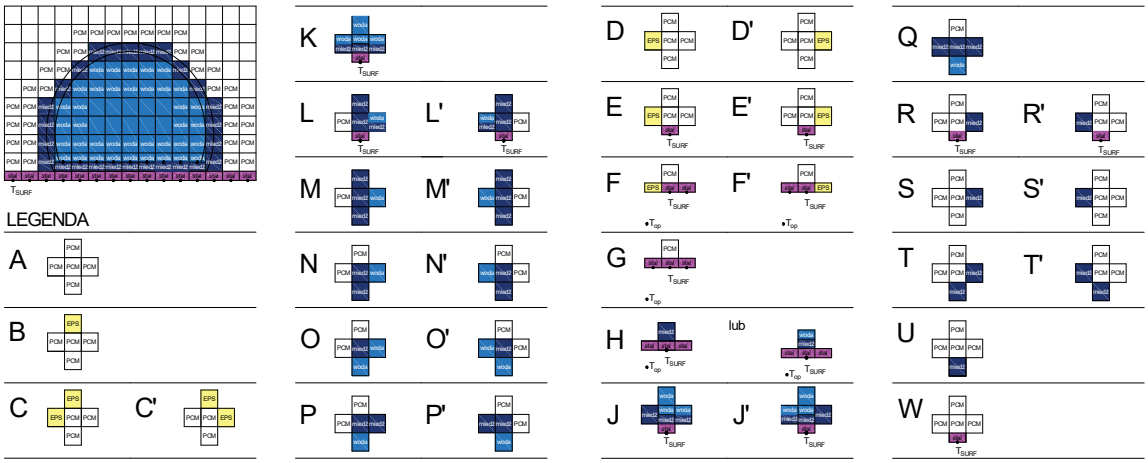


Rys. 10. Przekroje panelu grzewczo-chłodzącego, dla których wykonano symulacje

W celu poznania wpływu kroku czasowego na otrzymane wyniki przeprowadzono symulacje dla takich samych warunków początkowych i brzegowych dla kroku czasowego (tc): 5 min., 10 min., i 30 min. Zaobserwowano, że w celu określenia właściwości cieplnych systemu dla profili użytkowania, w których występuje przerwa w pracy, krok czasowy nie powinien być większy niż 10 min. Różnica w otrzymanych przebiegach temperatury pomiędzy tc=5 min. i tc=10 min. jest pomijalna dla analizowanej dynamiki zmian, dlatego analizy przeprowadzono w oparciu o symulacje dla tc=10 min.

Dyskretyzacja przestrzeni

Ze względu na geometrię badanych paneli grzewczo-chłodzących (model fizyczny) przyjęto dla przekroju panelu krok przestrzenny $\Delta x = \Delta y = 0{,}0012\ m$. Powierzchnia została podzielona na 16500 komórek bilansowych.



Rys. 11. Rodzaje komórek bilansowych w panelu grzewczo-chłodzącym wypełnionym PCM (wybrane)

3.2. Walidacja modelu

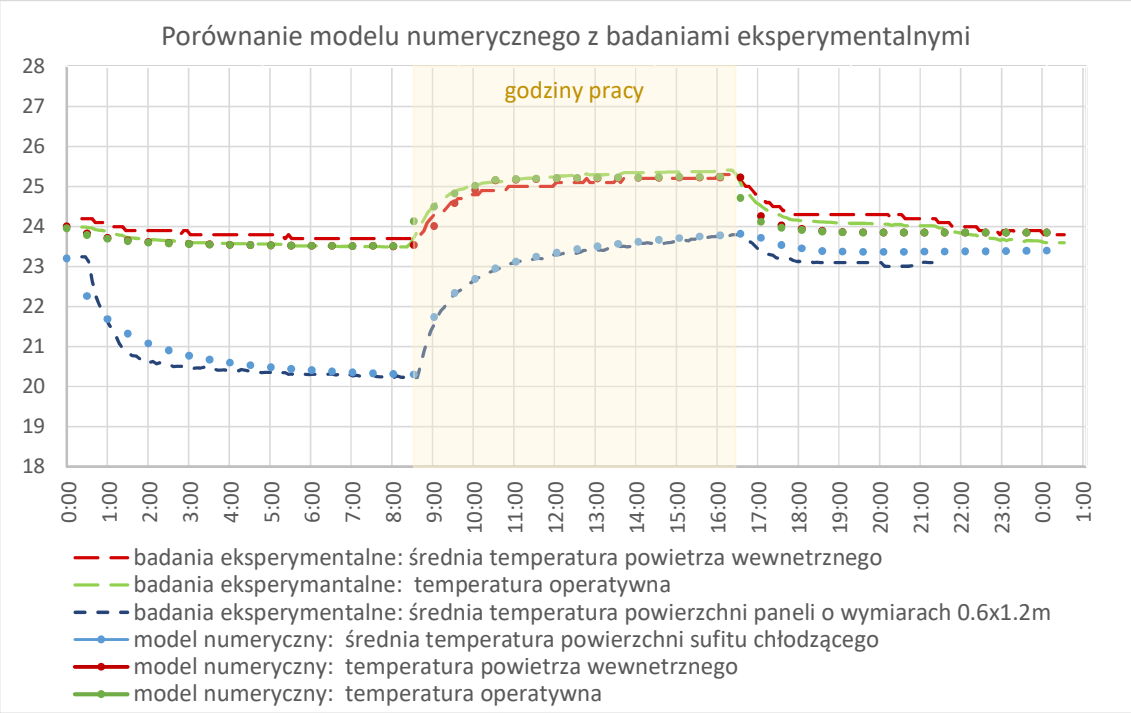
Walidacja modelu numerycznego została przeprowadzona poprzez porównanie z wynikami badań eksperymentalnych wykonanych w komorze doświadczalnej. Porównywana temperatura operatywna uwzględnia oddziaływanie zysków ciepła na czujnik temperatury promieniowania.

W celu wykonania oceny dopasowania modelu numerycznego do wyników badań eksperymentalnych wykorzystano błąd względny oraz pierwiastek błędu średniokwadratowego RMSE (*Root Mean Square Error*).

WARIANT 1 (rys. 12)

Tryb pracy:

- 00:30-8:30 – regeneracja sufitu aktywowanego termicznie z wypełnieniem, temperatura wody na zasilaniu: 17°C, brak zysków ciepła,
- 8:30-16:30 – zyski ciepła jawnego w pomieszczeniu: 220 W (godziny pracy: 8h),
- 16:30-24:00 – wyrównanie temperatury w pomieszczeniu i temperatury sufitu aktywowanego termicznie, brak zysków ciepła.



Rys. 12. Porównanie modelu numerycznego z badaniami eksperymentalnymi – wariant 1

Wyniki obliczeń RMSE przedstawiają się następująco dla:

- temperatury powietrza w pomieszczeniu: $RSME(t_a) = 0{,}214$,
- średnia temperatura powierzchni paneli grzewczo: $RSME(t_s) = 0{,}175$.

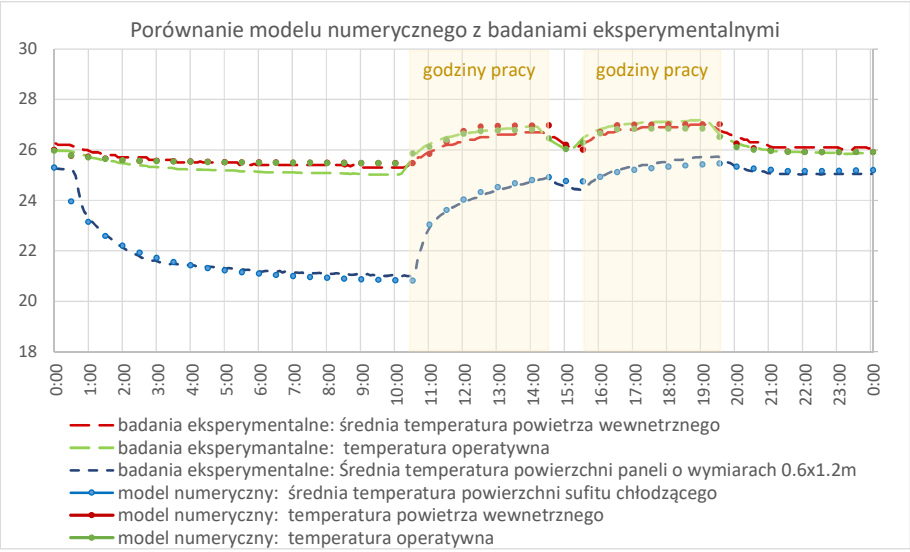
Błąd względny pomiędzy wynikami obliczeń numerycznych, a badaniami eksperymentalnymi:

- temperatura powietrza w pomieszczeniu: $\varphi(t_a) = 0{,}883\%$,
- średnia temperatura powierzchni paneli grzewczo-chłodzących: $\varphi(t_s) = 0{,}795\%$.

WARIANT 2 (rys. 13)

Tryb pracy:

- 00:30-10:30 – regeneracja sufitu aktywowanego termicznie z wypełnieniem PCM, średnia temperatura wody na zasilaniu: 16,2°C, brak zysków ciepła,
- 10:30-19:30 – zyski ciepła jawnego w pomieszczeniu: 220 W (godziny pracy: 9 h z przerwą lunchową od 14:30 do 15:30),
- 19:30-24:00 – wyrównanie temperatury w pomieszczeniu i temperatury sufitu aktywowanego termicznie, brak zysków ciepła.



Rys. 13. Porównanie modelu numerycznego z badaniami eksperymentalnymi – wariant 2

Wyniki obliczeń RMSE przedstawiają się następująco dla:

- temperatury powietrza w pomieszczeniu: RSME(t_a) = 0,166,
- średnia temperatura powierzchni paneli grzewczo-chłodzących: RSME(t_s) = 0,151.

Błąd względny pomiędzy wynikami obliczeń numerycznych, a badaniami eksperymentalnymi:

- temperatura powietrza w pomieszczeniu: $\phi(t_a) = 0{,}636\%$,
- średnia temperatura powierzchni paneli grzewczo-chłodzących: $\phi(t_s) = 0{,}637\%$.

4. Obliczenia symulacyjne dla wybranych profili użytkowych

W celu przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych wybrano język programowania Python, który jest akceptowany przez społeczność naukową ze względu na łatwość użycia, platformę przyjazną dla użytkownika, jak również dostępność bibliotek (*open source*).

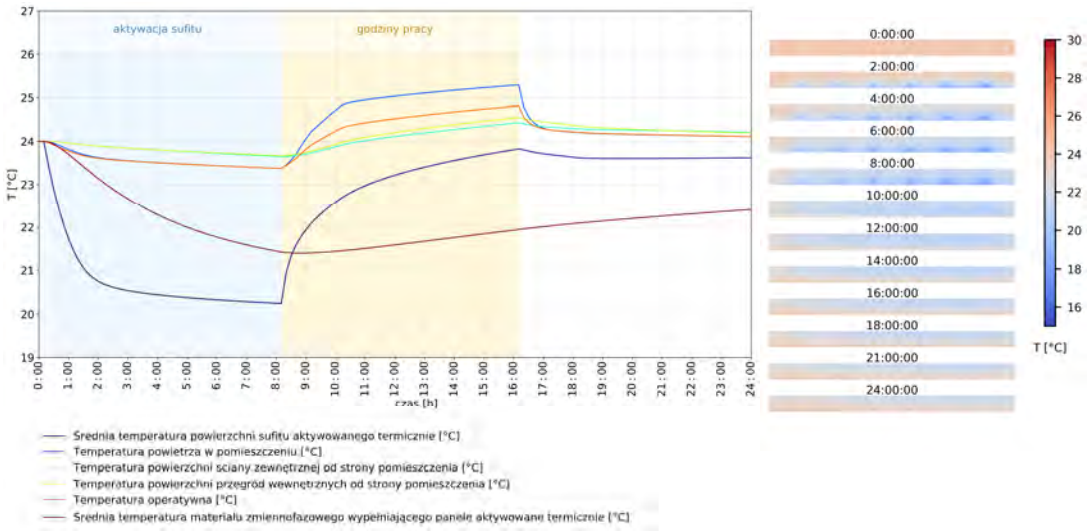
4.1. Tryb chłodzenia

W celu poznania dynamiki wymiany ciepła pomiędzy panelami aktywowanymi termicznie wypełnionymi materiałem zmiennofazowym a pomieszczeniem biurowym, administracyjnym i uczelnianym w trybie chłodzenia, dla wybranych warunków początkowych i brzegowych, przeprowadzono symulacje. W tabeli 2 przedstawiono zestawienie wariantów, dla których wykonano obliczenia numeryczne.

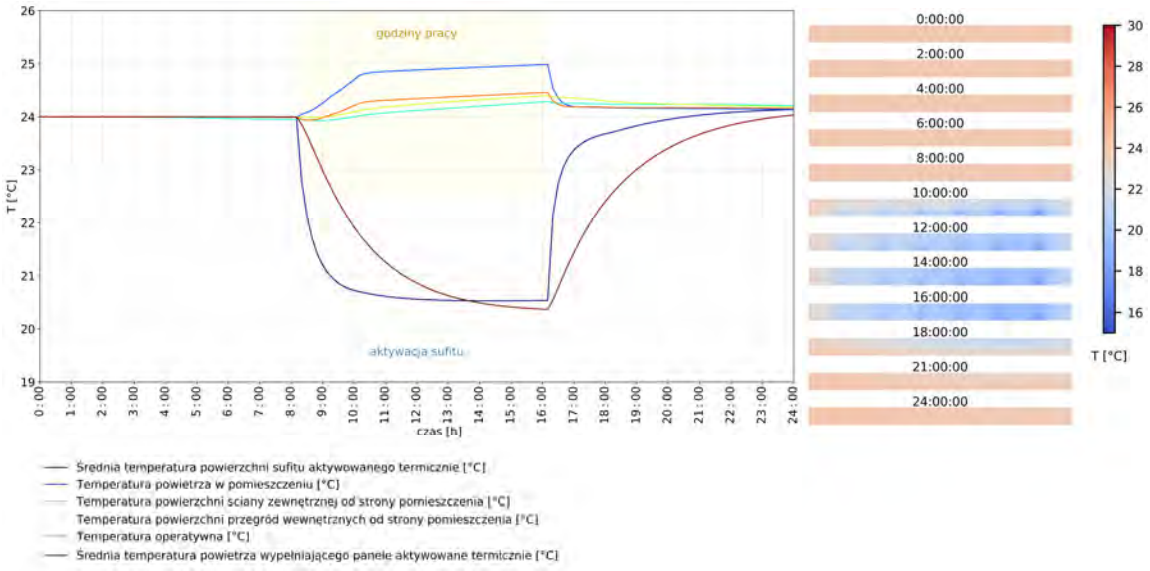
Tabela 2. Zmienne w analizowanych wariantach dla trybu chłodzenia

Wariant (W)	Profil użytkowania (godziny pracy) [h:min]	Temperatura wody na zasilaniu [°C]	Wypełnienie paneli g-ch	Warunki brzegowe dla pomieszczenia	Aktywacja sufitu [h:min]
W.1	8:00-16:00	17,7	PCM	komora doświadczalna (24°C)	regeneracja 00:00-08:00
W.2	10:00-14:00 15:00-19:00	16,2	PCM	komora doświadczalna (26°C)	regeneracja 00:00-10:00
W.3	8:00-16:00	17,7	PCM	rzeczywiste	regeneracja 00:00-08:00
W.4	09:00-13:00 14:00-18:00	16,2	PCM	rzeczywiste	regeneracja 00:00-09:00
W.5	uczelnia 10:20-20:40	16,2	PCM	rzeczywiste	regeneracja 00:00-10:20
W.6	8:00-16:00	17,7	Powietrze	rzeczywiste	regeneracja 00:00-08:00
W.7	09:00-13:00 14:00-18:00	16,2	Powietrze	rzeczywiste	regeneracja 00:00-09:00
W.8	uczelnia 10:20-20:40	16,2	Powietrze	rzeczywiste	regeneracja 00:00-10:20
W.9	8:00-16:00	17,7	Powietrze	rzeczywiste	w godzinach pracy
W.10	06:00-10:00 11:00-15:00	16,2	Powietrze	rzeczywiste	w godzinach pracy
W.11	uczelnia 08:00-18:20	16,2	Powietrze	rzeczywiste	w godzinach pracy

W obliczeniach symulacyjnych ściany wewnętrzne zostały zamodelowane jako elementy adiabatyczne, poprzez narzucenie takich samych warunków temperaturowych w sąsiadujących pomieszczeniach. Uwzględniono przewodzenia ciepła przez ścianę zewnętrzną dla warunków klimatycznych miasta Poznania. Analizowano dobę, w której wystąpiła najwyższa temperatura powietrza zewnętrznego. Dla danego profilu użytkowania ustalono stały strumień masy wody, temperaturę zasilania i długość okresu aktywacji sufitu w celu porównania systemu z wypełnieniem PCM oraz bez wypełnienia PCM. Na rysunkach 14 i 15 zaprezentowano zmianę temperatury w czasie doby dla pomieszczenia biurowego pracującego w trybie 8 h: system z PCM (W.3) i bez PCM (W.9).



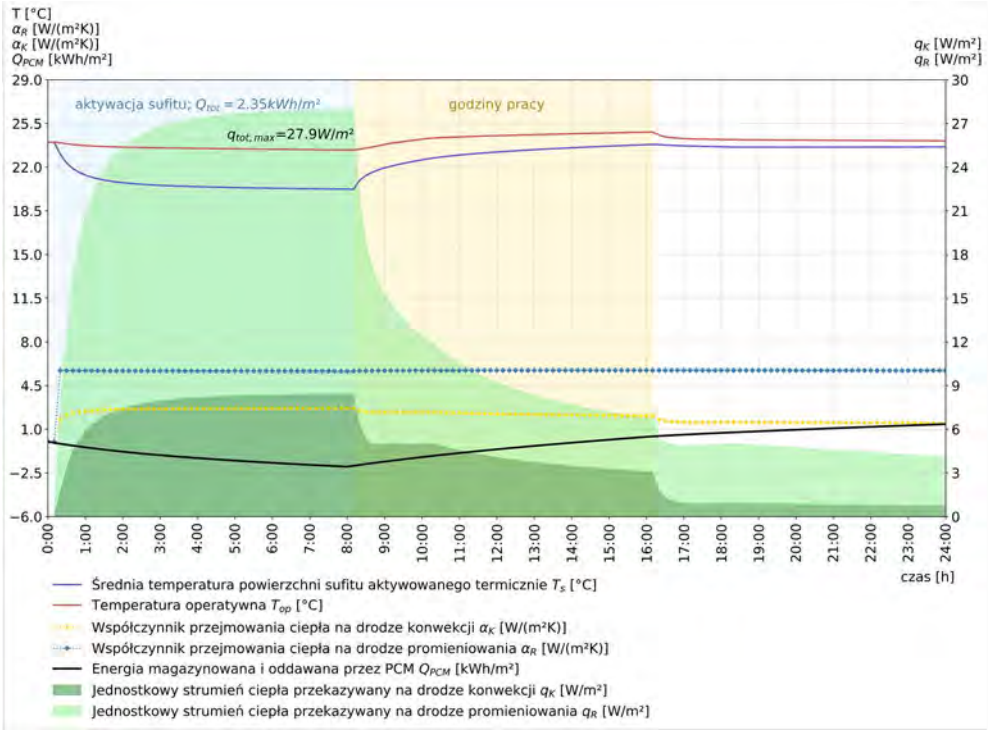
Rys.14. Dobowa zmiana temperatury w pomieszczeniu z sufitem chłodzącym wypełnionym PCM (W.3)



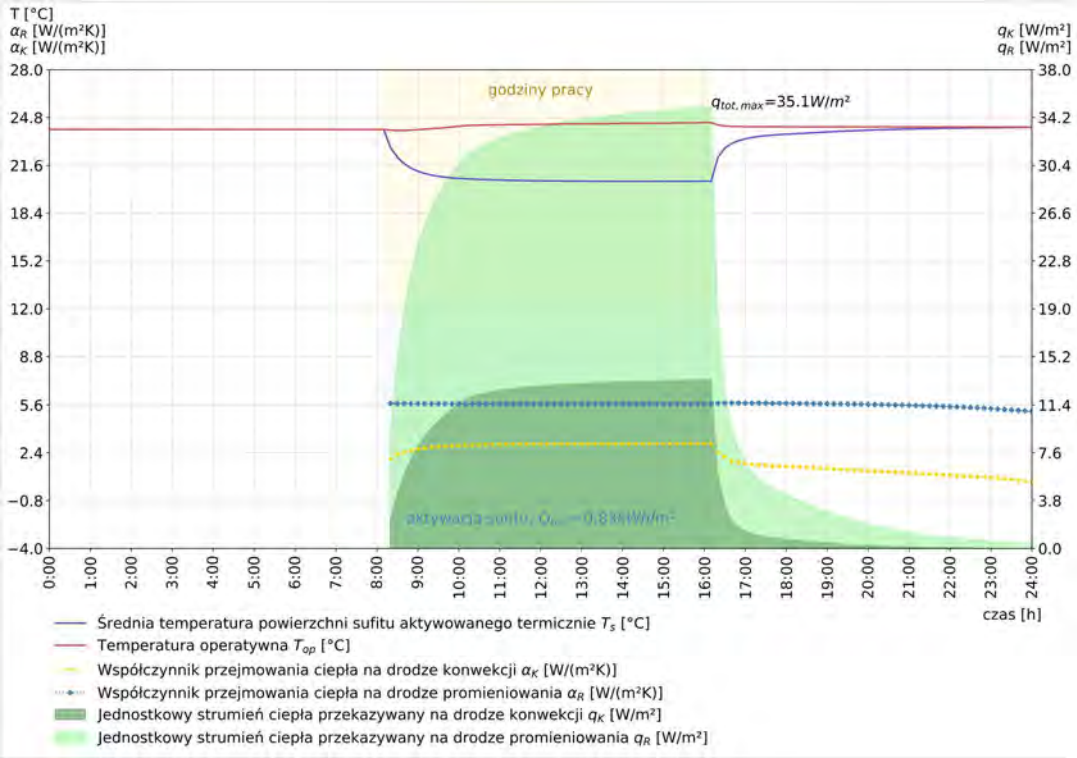
Rys. 15. Dobowa zmiana temperatury w pomieszczeniu z sufitem chłodzącym bez PCM (W.9)

Dla każdego profilu użytkowania porównano 3 sposoby działania systemu, różniące się wypełnieniem sufitu (PCM lub powietrze) i godzinami jego aktywacji. Analizowano właściwości cieplne dla warunków rzeczywistych.

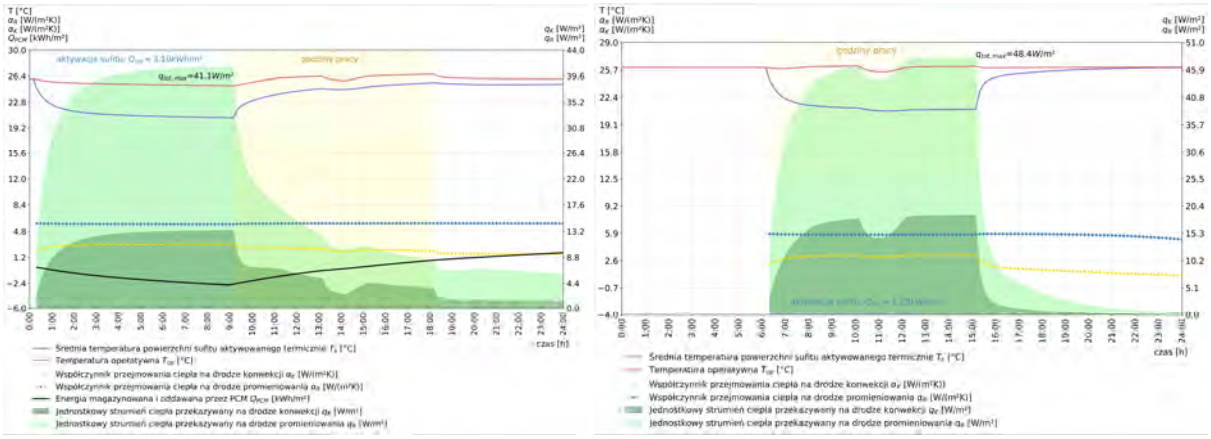
Na rysunkach 16-19 przedstawiono wybrane właściwości cieplne paneli grzewczo-chłodzących z wypełnieniem PCM oraz bez wypełnienia PCM. Jednostkowy strumień ciepła przekazywany na drodze promieniowania i konwekcji oraz energia magazynowana i oddawana przez PCM zostały odniesione do 1 m^2 powierzchni sufitu aktywowanego termicznie. Na każdym rysunku opisano całkowitą energię przekazaną przez system do pomieszczenia i wypełnienia paneli (Q_{tot}) oraz jednostkową moc szczytową przekazaną do pomieszczenia ($q_{tot,max}$).



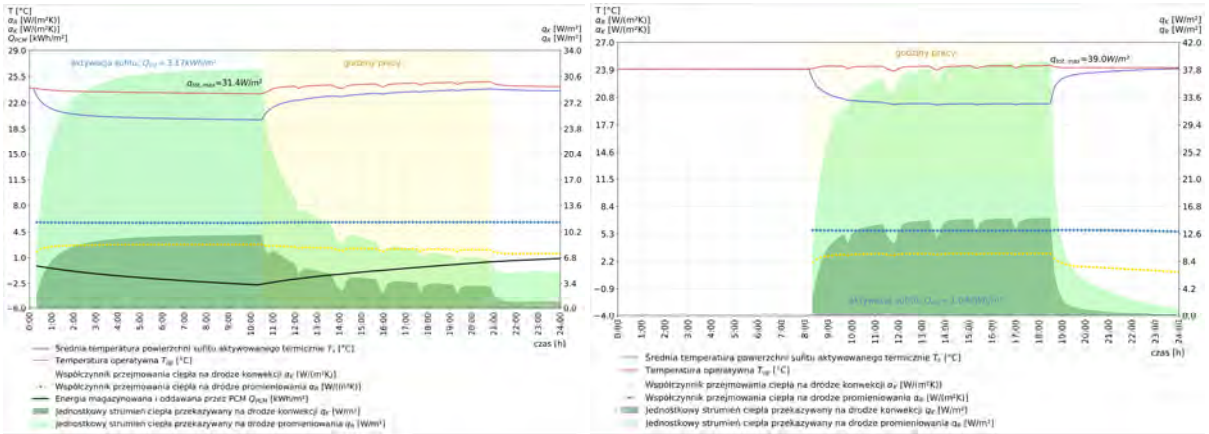
Rys. 16. Właściwości cieplne panelu grzewczo-chłodzącego z PCM w czasie doby – tryb chłodzenia (W.3)



Rys. 17. Właściwości cieplne panelu grzewczo-chłodzącego bez PCM w czasie doby– tryb chłodzenia (W.9)



Rys. 18. Właściwości cieplne panelu grzewczo-chłodzącego z PCM (po lewej: W.4) oraz bez wypełnienia PCM (po prawej: W.10) w czasie doby – tryb chłodzenia



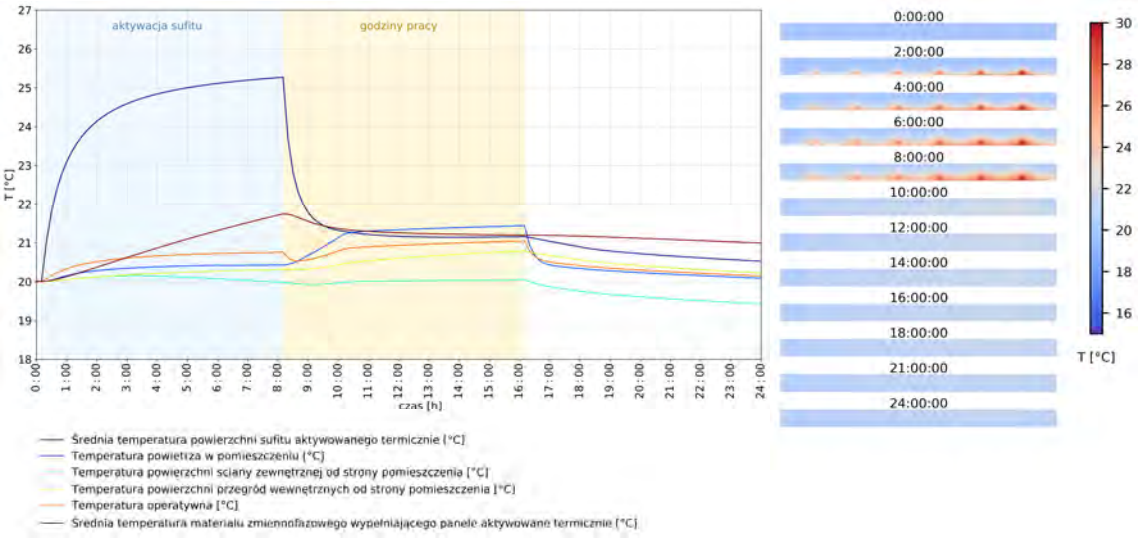
Rys. 19. Właściwości cieplne panelu grzewczo-chłodzącego z PCM (po lewej: W.5) oraz bez wypełnienia PCM (po prawej: W.11) w czasie doby – tryb chłodzenia

4.2. Tryb grzania

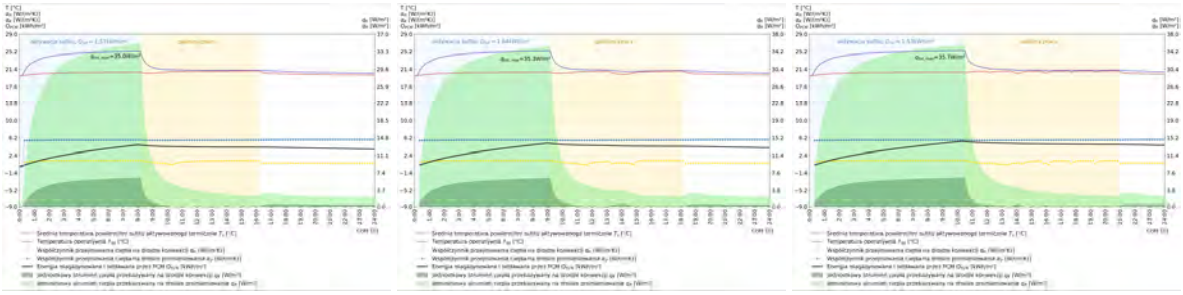
Sufit aktywowany termicznie z wypełnieniem PCM poddano również analizie dla wybranych warunków w trybie grzania. Zmienne w analizowanych wariantach przedstawiono w tabeli 3. Na rysunku 20 zaprezentowano przykładowy wykres przedstawiający zmianę temperatury w czasie doby dla pomieszczenia biurowego (W.12), a na rysunku 21 właściwości cieplne wybranych wariantów (W.12-W.14).

Tabela 3. Zmienne w analizowanych wariantach dla trybu grzania

Wariant (W)	Godziny pracy [h:min]	Temperatura wody na zasilaniu [°C]	Wypełnienie paneli grzewczo-chłodzących	Warunki brzegowe dla pomieszczenia	Aktywacja sufitu [h:min]
W.12	8:00-16:00	30	PCM	rzeczywiste	regeneracja 00:00-08:00
W.13	09:00-13:00 14:00-18:00	30	PCM	rzeczywiste	regeneracja 00:00-09:00
W.14	uczelnia 10:20-20:40	30	PCM	rzeczywiste	regeneracja 00:00-10:20
W.15	8:00-16:00	30	Powietrze	rzeczywiste	w godzinach pracy 08:00-16:00
W.16	10:00-14:00 15:00-19:00	30	Powietrze	rzeczywiste	w godzinach pracy 10:00-19:00
W.17	uczelnia 08:00-18:20	30	Powietrze	rzeczywiste	w godzinach pracy 08:00-18:20



Rys.20. Zmiana temperatury w czasie doby w pomieszczeniu z sufitem aktywowanym termicznie wypełnionym PCM – tryb grzania (przekrój B, W.12)



Rys.21. Właściwości cieplne panelu grzewczo-chłodzącego z wypełnieniem PCM w czasie doby – tryb grzania (od lewej: W.12, W.13, W.14)

5. Zasady budowy algorytmu dla sterownika

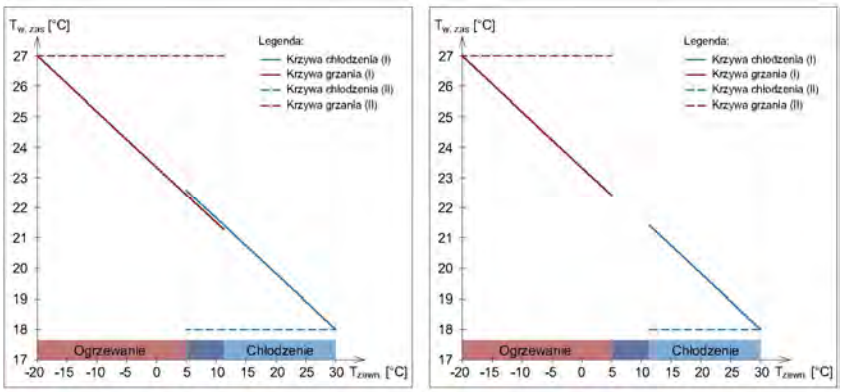
Zasady budowy algorytmu dla sterownika zaproponowano na podstawie uzyskanych wyników oraz w oparciu o literaturę. Z uwagi na zdolność magazynowania energii, podstawowe zasady budowy algorytmu sterowania dla analizowanego rozwiązania są takie same jak dla stropów aktywowanych termicznie, natomiast ze względu na możliwość szybkiej odpowiedzi systemu na przekroczenie warunków zadanych w pomieszczeniu, wprowadzane są wybrane zasady stosowane dla sufitu aktywowanego termicznie (bez wypełnienia PCM). Strategia sterowania ma na celu zapewnić temperaturę komfortu cieplnego, jednocześnie zmniejszając zużycie energii na cele ogrzewania i chłodzenia. Sterowanie sufitem aktywowanym termicznie z wypełnieniem PCM oparte o adaptacyjny komfort cieplny charakteryzujący się niestacjonarnym podejściem, jest możliwe dzięki samoregulacji układu.

Metody regulacji sufitów aktywowanych termicznie z wypełnieniem PCM można podzielić na: jakościową opartą na zmianie temperatury czynnika grzewczo-chłodzącego, ilościową (zmienną jest czas ładowania PCM) oraz ilościowo-jakościową. Regulacja temperatury wody na zasilaniu sufitu jest realizowana w funkcji zmian temperatury zewnętrznej oraz/lub temperatury operatywnej.

Algorytm sterowania dla sufitu aktywowanego termicznie z wypełnieniem PCM może zostać skonfigurowany na dwa sposoby:

- praca ciągła lub przerywana: aktywacja sufitu w celu regeneracji PCM poza godzinami przebywania ludzi w pomieszczeniu (w okresie nocy) oraz ciągłe monitorowanie i dostosowywanie do warunków w pomieszczeniu (poprzez aktywację sufitu), jeżeli regeneracja nocna była niewystarczająca (w zależności od temperatury operatywnej),
- wydzielenie dwóch okresów (praca na zasadzie włącz-wyłącz):
    - regeneracja PCM w nocy,
    - rozładowanie PCM podczas wystąpienia obciążeń chłodniczych w trakcie dnia.

Wyróżniamy dwa główne podejścia do sterowania (rys. 22). W bardziej zaawansowanym (I) krzywa grzania i chłodzenia jest funkcją liniową przedstawiającą zależność temperatury wody na zasilaniu od temperatury zewnętrznej. Prostsze rozwiązanie (II) polega na określeniu stałej temperatury wody na zasilaniu w zależności od trybu pracy (grzanie/chłodzenia). Krzywa chłodzenia i grzania zależy od typu budynku i pomieszczenia.



Rys.22. Krzywe grzania i chłodzenia dla pojedynczej strefy.

W budynku, w którym występują pomieszczenia zewnętrzne i wewnętrzne, w okresie przejściowym może wystąpić jednocześnie konieczność grzania i chłodzenia (rys. 22a). Aby sprostać wymaganiom istotne jest wydzielenie stref o podobnych zyskach ciepła. W standardowym budynku biurowym, w którym wszystkie pomieszczenia są zewnętrzne, w okresie przejściowym praca systemów ogrzewania i chłodzenia nie jest wymagana, aby utrzymać komfort cieplny (rys. 22b).

Wytyczne:

W budynkach z sufitami aktywowanymi termicznie wypełnionymi PCM należy wydzielić strefy o podobnym obciążeniu chłodniczym (cieplnym), dla których wyznaczane są krzywe grzania i chłodzenia. W zależności od liczby stref i ich wymagań dokonywany jest wybór układu technologicznego, który ma wpływ na strategię sterowania.

Strategia sterowania powinna uwzględniać charakterystykę przemiany fazowej materiału wypełniającego panele grzewczo-chłodzące, aby w pełni wykorzystać potencjał PCM. W celu wykorzystania odnawialnych źródeł energii istotne jest obliczenie zdolności magazynowania energii przez PCM.

W celu utrzymania temperatury w pomieszczeniu w zakresie komfortu cieplnego krzywa chłodzenia powinna znajdować się powyżej krzywej grzania lub stanowić kontynuację krzywej grzania (rys. 22).

Konieczne jest zabezpieczenie układu przed wykropleniem się pary wodnej na powierzchni sufitu aktywowanego termicznie podczas trybu chłodzenia. Temperatura powierzchni nie powinna być niższa niż temperatura punktu rosy. Wilgotność względna powinna być kontrolowana przez system wentylacji mechanicznej.

Czujniki temperatury w pomieszczeniu powinny zostać zamontowane w strefie przebywania ludzi na wysokości 1,1 m (wysokość na jakiej znajduje się głowa człowieka wykonującego pracę biurową).

W celu zapewnienia komfortu cieplnego, system sufitów chłodzących wypełnionych PCM musi współpracować z systemem wentylacji mechanicznej. Najbardziej odpowiednim typem jest wentylacja źródłowa zapewniająca powietrze o najwyższej jakości w strefie przebywania ludzi i zachowująca prędkość powietrza mniejszą niż 0,2 m/s. Temperatura powietrza nawiewanego powinna być niewiele niższa od temperatury w pomieszczeniu.

6. Wnioski i kierunki dalszych badań

Wnioski

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych, analiz numerycznych i symulacji wynikają następujące wnioski:

1) teza została udowodniona;
2) w analizie sufitu aktywowanego termicznie z wypełnieniem PCM, w celu uwzględnienia bezpośredniego odbioru przez system wewnętrznych zysków ciepła na drodze promieniowania oraz wpływu powierzchni nieaktywowanych termicznie na bilans ciepła

w pomieszczeniu, konieczne jest rozdzielenie przejmowania ciepła na drodze promieniowania i konwekcji;

3) zintegrowanie sufitu aktywowanego termicznie z materiałem o dużej pojemności cieplnej zwiększa złożoność oceny energetycznej oraz procesu projektowania, ponieważ konieczne jest przeprowadzenie symulacji w stanach nieustalonych. Badania sufitu grzewczo-chłodzącego w warunkach dynamicznych są niezbędne do budowy algorytmu sterowania systemem. Brak gotowych modeli/aplikacji stwarza konieczność opracowania modeli numerycznych uwzględniających geometryczne warunki brzegowe oraz charakterystykę materiału zmiennofazowego;
4) w celu przeprowadzenia symulacji oddziaływania sufitu aktywowanego termicznie z wypełnieniem PCM na warunki cieplne w pomieszczeniu, konieczne jest poznanie przebiegu przemiany fazowej zastosowanego materiału oraz opracowanie zależności ciepła właściwego PCM od temperatury i kierunku przemiany;
5) opracowany model numeryczny służy do symulacji przebiegu zmian temperatury w określonym przedziale czasu dla pomieszczenia z sufitem grzewczo-chłodzącym z wypełnieniem PCM oraz bez wypełnienia PCM w zależności od profilu użytkowania, harmonogramu aktywacji sufitu, temperatury wody na zasilaniu, strumienia masy wody i temperatury powietrza zewnętrznego;
6) przeprowadzone badania eksperymentalne i obliczenia numeryczne potwierdzają, że stosunkowo małe różnice temperatury pomiędzy pomieszczeniem i powierzchnią sufitu aktywowanego termicznie, pozwalają na wysoki poziom samoregulacji układu w zależności od warunków występujących w pomieszczeniu;
7) ocena i wybór strategii sterowania powinny być prowadzone w oparciu o kryteria komfortu cieplnego i efektywności energetycznej. W celu opracowania strategii sterowania konieczne jest uwzględnienie zdolności magazynowania energii przez PCM. Projektową pojemność cieplną można obliczyć znając projektowe obciążenie chłodnicze i profil użytkowania pomieszczenia, korzystając ze wzoru: $\dot{Q} \cdot t_{o,ch} = \mathrm{m} \cdot \Delta \mathrm{h}_{PF}$ [J];
8) wypełnienie paneli grzewczo-chłodzących materiałem zmiennofazowym poprawia pojemność cieplną budynku, co jest korzystne dla budynków o konstrukcji lekkiej. W analizowanym układzie zastosowano materiał o nazwie handlowej PX21 (krzemionka nasączoną parafiną), którego warstwa o grubości 5 cm w zakresie temperatury 18-25°C (ΔT=7 K) odpowiada pojemności cieplnej stropu żelbetowego o grubości 16 cm;
9) wypełnienie sufitu grzewczo-chłodzącego materiałem PX21, pozwala na stabilizację temperatury w pomieszczeniu oraz przeniesienie aktywacji sufitu (regeneracji PCM) i mocy szczytowej na okres o obniżonej temperaturze w cyklu dobowym, umożliwiając lepszą współpracę z niskotemperaturowymi odnawialnymi źródłami energii;
10) aktywacja systemu poza godzinami przebywania użytkowników stwarza możliwość rozszerzenia zakresu temperatury wody na zasilaniu, ponieważ nie ma konieczności zapewnienia komfortu cieplnego w pomieszczeniu. Ograniczeniem projektowym jest temperatura powierzchni sufitu, która nie może być niższa niż temperatura punktu rosy;
11) analizowane rozwiązanie daje możliwość bezpośredniego odbioru obciążenia chłodniczego, poprzez aktywację termiczną systemu, w czasie wystąpienia warunków przekraczających założenia projektowe (dodatkowe zyski ciepła). Zapewniając szybką reakcję systemu podczas wystąpienia warunków krytycznych oraz możliwość zmiany

czasu regeneracji PCM system pozwala na utrzymanie komfortu cieplnego w przypadku zmiany przeznaczenia pomieszczenia, wpływającej na zmianę profilu użytkowania;

12) wodne systemy klimatyzacji są efektywniejsze energetycznie od systemów powietrznych, dlatego możliwość odbioru zysków ciepła w czasie ich wystąpienia (np. zysków ciepła nieprzewidzianych podczas procesu projektowania) przez sufit aktywowany termicznie z wypełnieniem PCM (bez konieczności zwiększenia strumienia nawiewu lub mocy urządzeń systemu wentylacji mechanicznej), poprawia ocenę energetyczną systemów HVAC;
13) wyniki badań, które zostały opisane w literaturze wskazują na potencjał obniżenia mocy szczytowej, zużycia energii do chłodzenia i w konsekwencji obniżenia kosztów eksploatacyjnych poprzez zastosowanie algorytmów sterowania opartych na modelu adaptacyjnego komfortu cieplnego dla sufitu grzewczo-chłodzącego z wypełnieniem PCM;
14) zaletą systemów wodnych, w porównaniu z systemami tylko powietrznymi wykorzystywanymi do odprowadzenia lub doprowadzenia ciepła, jest ich cicha praca. Natomiast, w porównaniu z systemem stropów aktywowanych termicznie, ze względu na brak ingerencji w konstrukcję budynku, sufit grzewczo-chłodzący z wypełnieniem PCM ma szersze zastosowanie, np. w budynkach termomodernizowanych. Ograniczeniem konstrukcyjnym jest wysokość pomieszczenia, która powinna uwzględnić możliwość montażu sufitu podwieszanego.

Kierunki dalszych badań

Przeprowadzone badania pozwoliły na sprecyzowanie kierunków dalszych prac:

1) opracowanie modułu sufitu aktywowanego termicznie wypełnionego materiałem zmiennofazowym gotowego do zaimplementowania w programie TRNSYS;
2) opracowanie algorytmu sterowania na podstawie symulacji przeprowadzonych dla różnych profili użytkowania i temperatury wody na zasilaniu;
3) przeprowadzenie symulacji pracy systemu sufitów grzewczo-chłodzących dla okresu całego roku, w celu obliczenia rocznego zapotrzebowania energii na cele chłodzenia i ogrzewania;
4) implementacja do opracowanego modelu numerycznego algorytmu sterowania opartego o adaptacyjny komfort cieplny (ACA - *Adaptive Control Algorithm*);
5) określenie wpływu różnego typu instalacji wentylacji mechanicznej na działanie sufitu chłodzącego z wypełnieniem PCM i warunki w pomieszczeniu;
6) badania eksperymentalne w warunkach rzeczywistych dla pomieszczeń biurowych i edukacyjnych;
7) badania nad intensyfikacją przewodzenia ciepła wypełnienia paneli grzewczo-chłodzących, np. poprzez zastosowanie żeber (wtrąceń) z metalu o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła lub zmieszania z materiałem o wysokiej przewodności cieplnej;
8) analiza ekonomiczna uwzględniająca koszty inwestycyjne i eksploatacyjne oraz prognozy zachowania rynku energii dla komercyjnego zastosowania paneli grzewczo-chłodzących z wypełnieniem PCM.

7. Dorobek naukowy

[1] **Sinacka J**., E. Szczechowiak, Stropy i sufity grzewczo-chłodzące o dużej pojemności cieplnej, *Materiały budowlane 1 (2019)*, pp. 54-56,

[2] **Sinacka J**., E. Szczechowiak, P. Żabicka, Wpływ profilu użytkowania pomieszczenia na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia w budynku ze stropami grzewczo--chłodzącymi, *Instal 10 (2019)*, pp. 34-37,

[3] **Sinacka J**., K. Ratajczak, Analysis of selected input data impact on energy demand in office building - case study, *MATEC Web of Conferences 222, 01015 (2018)*, pp. 1-8,

[4] **Sinacka J**., E. Szczechowiak, Modelowanie przepływu ciepła w budynku ze stropami i sufitami grzewczo-chłodzącymi, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, T, 49, nr 7 (2018)*, pp. 271-278,

[5] Szczechowiak E., R. Górzeński, A. Górka, M. Gaczek, K. Bandurski, **J. Sinacka**, A. Michalak, Badania specjalistyczne sprawdzające właściwości termoregulacyjne tynku cementowo-wapiennego, Sprawozdanie techniczne, Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, 2018, pp. 1–19,

[6] Szczechowiak E., R. Górzeński, A. Górka, M. Gaczek, K. Bandurski, **J. Sinacka**, A. Michalak, Badania specjalistyczne sprawdzające właściwości termoregulacyjne tynku gipsowego, Sprawozdanie techniczne, Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej (2018), pp. 1–19,

[7] Szczechowiak E., R. Górzeński, A. Górka, M. Gaczek, M. Michałkiewicz, K. Bandurski, **J. Sinacka**, Badania specjalistyczne sprawdzające właściwości antykondensacyjne farby i jej odporność na agresję mikrobiologiczną, Sprawozdanie techniczne, Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej (2018), pp. 1–30,

[8] Szczechowiak E., R. Górzeński, A. Górka, M. Gaczek, M. Michałkiewicz, K. Bandurski, **J. Sinacka**, Badania specjalistyczne sprawdzające właściwości antykondensacyjne tynku i jego odporność na agresję mikrobiologiczną, Sprawozdanie techniczne, Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej (2018), pp. 1–30,

[9] **Sinacka J.**, E, Szczechowiak, Analiza eksploatacyjna budynku pasywnego w aspekcie komfortu klimatycznego i zużycia energii, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja 48, 12 (2017)*, pp. 497-504,

[10] Jaskulska R., **J. Jaskulska**, Efficiency of old and young shelterbelts in reducing the contents of nutrients in Luvisols Agriculture, Ecosystems and Environment 240 (2017), pp. 269-275

[11] Filipiak M., **J. Jaskulska**, Zastosowanie materiałów zmiennofazowych w wybranych energooszczędnych układach HVAC w: Budownictwo a środowisko: projektowanie i modernizacja obiektów budowlanych, praca zbiorowa pod red, Zbigniew Bromberek, *Wydawnictwo Zarządu oddziału PZITB w Poznaniu (2017)* – pp. 177-190

[12] **Jaskulska J.**, B, Radomski, I. Rzeźnik, A. Figielek, Analiza parametrów budynku dostosowanego do standardu pasywnego według kryteriów Passive House Institute, *Rynek Instalacyjny 1-2 (2016)*, pp. 50-56,

[13] Radomski B., **J. Jaskulska**, Integracja systemów wentylacyjnych i grzewczo-chłodzących dla budynków pasywnych jednorodzinnych, *Rynek Instalacyjny 11 (2016)*, pp. 51-56,

[14] **Jaskulska J**., R. Jaskulska, Wpływ standardów energetycznych i rodzaju zaopatrzenia w ciepło na emisję zanieczyszczeń oraz koszty ekonomiczne, *Rynek Instalacyjny 9 (2016),* pp. 42-47

[15] Bagieński Z., **J. Jaskulska**, Ograniczenie wpływu źródeł zaopatrzenia w ciepło na jakość powietrza w obszarach intensywnej zabudowy niskiej, w: Powietrze atmosferyczne: jakość, zagrożenia, ochrona: praca zbiorowa, red, Kazimierz Gaja, Józef Kuropka - Wrocław, Poland: *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej (2016)* pp. 18-29

[16] Amanowicz Ł., **J. Jaskulska**, Projektowanie przyłączy wodnych i kanalizacyjnych w praktyce – aspekty formalno-prawne, *Rynek Instalacyjny 4 (2015),* pp. 76-81