

Maciej JAWORSKI

Piotr ŁAPKA

Piotr FURMAŃSKI

**Pomiary eksperymentalne i modelowanie
zasobnika ciepła wykonanego z kompozytu
gips - PCM**



Plan seminarium

1. Wprowadzenie
 2. Koncepcja systemu wentylacji z PCMem
umieszczonym w strukturze budynków oraz
stanowisko pomiarowe
 3. Wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych
 4. Model matematyczny i numeryczny
 5. Wyniki obliczeń
 6. Wnioski
-



1. Wprowadzenie



Wprowadzenie

Czynniki wpływające na warunki termiczne wewnątrz budynku

- Klimat (temperatura zewnętrzna, wiatr, nasłonecznienie),
- Struktura budynku (materiały, z których wykonana jest konstrukcja budynku oraz zastosowane materiały izolujące),
- System wentylacji,
- Źródła energii.

Metody obniżenia zużycia energii w budynkach

- Izolacje,
- Zwiększenie efektywności źródeł energii,
- Zwiększenie pojemności cieplnej struktury budynku:
 - Większa bezwładność cieplna budynku (redukcja fluktuacji temperatury wewnętrznej),
 - Większa efektywność wykorzystania energii odnawialnej (akumulacja ciepła),
 - Większa efektywność free-cooling (pochłanianie ciepła generowanego wewnątrz budynku, lepsze „wyziębienie” budynku w nocy na skutek intensywnej wentylacji).



Wprowadzenie

Zwiększenie pojemności cieplnej budynków poprzez zastosowanie materiałów zmiennofazowych (PCM)

- Magazyny ciepła z PCM,
- Elementy konstrukcyjne z dodatkami PCM:
 - Płyty gipsowe zawierające dodatki w postaci mikrokapsulek z PCMem, beton nasycony PCMem – magazynowanie energii w ścianach, sufitach i podłogach:
 - Absorpcja energii promieniowania słonecznego,
 - Absorpcja energii generowanej wewnątrz budynku,
 - Elementy układów wentylacyjnych zawierające PCM – kanały wykonane z kompozytów materiał budowlany i PCM:
 - Absorpcja energii generowanej wewnątrz budynku,
 - Obniżenie lub zwiększenie temperatury powietrza wprowadzanego z zewnątrz do budynku.

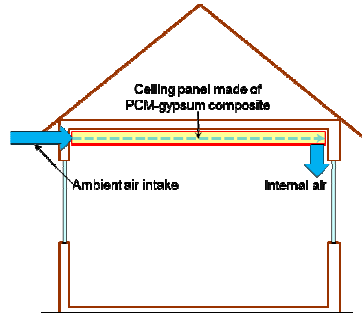


2. Koncepcja systemu wentylacji z PCMem umieszczonym w strukturze budynków oraz stanowisko pomiarowe

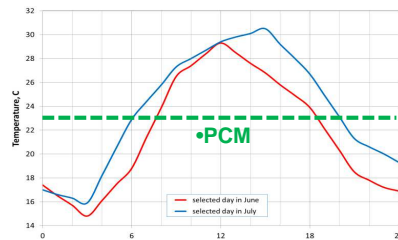


Koncepcja system wentylacji

Kanały wentylacyjne wykonane z kompozytu gips-PCM



Dobowe zmiany temperatury powietrza dla wybranych dni w czerwcu i lipcu na Mazowszu



Latem w ciągu dnia gorące powietrze zewnętrzne przepływa przez kanał ochładzając się i przekazując ciepło do jego materiału – ciepło jest akumulowane głównie w mikrokapsułkach z PCMem.

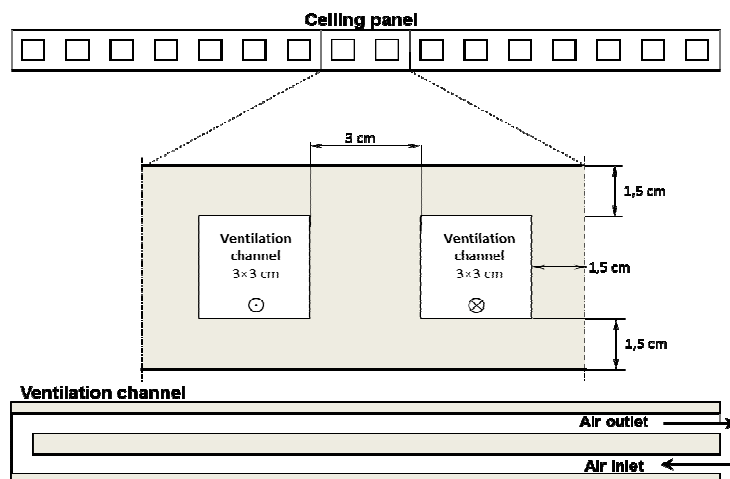
W nocy zimne powietrze zewnętrzne przepływając przez kanał odprowadza ciepło zgromadzone w jego ściankach, ogrzewając się i jednocześnie chłodząc kanał poniżej temperatury krzepnięcia PCMu.



7



Koncepcja system wentylacji



8



Stanowisko pomiarowe



9



Stanowisko pomiarowe

Mierzone wielkości:

- Temperatury powietrza w kanale – 8 termopar,
- Temperatury na powierzchni wewnętrznej kanału – 6 termopar,
- Temperatury na powierzchni zewnętrznej kanału – 6 termopar,
- Prędkość powietrza.

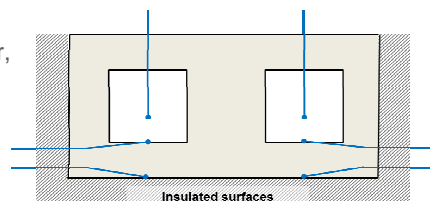
Procedura pomiarowa:

Testy laboratoryjne dla uproszczonych warunków pracy (24 godzinne cykle):

- Przez około 8 godzin przez kanał przepływało powietrze o temperaturze około 30 °C,
- Przez około 16 godzin przez kanały przepływało powietrze o temperaturze obniżonej do około 16 °C,
- Cykle powtarzano kilkakrotnie do momentu otrzymania stanu quasi-ustalonego.

Testy w warunkach pół-laboratoryjnych:

Przez kanał przepływało powietrze zewnętrzne (testy wykonane latem).



10



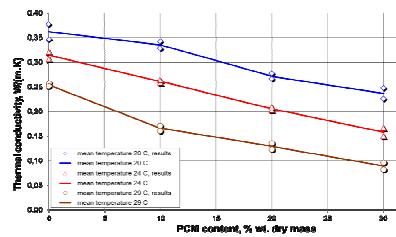
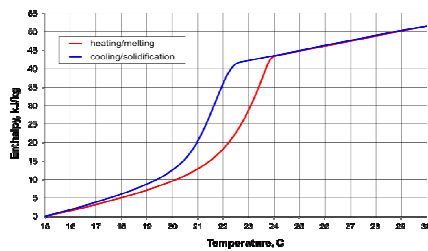
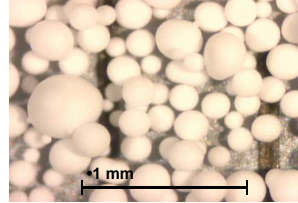
Właściwości kompozytu PCM-gips

Skład kompozytu

- Zaprawa gipsowa (Knauf),
- Mikrokapsułki z PCM: DS-5008X (BASF), 27.6 wag. %.

Właściwości

- Temperatura topnienia PCM: 22.8 °C (DSC),
- Histereza krzywej entalpia-temperatura (DSC),
- Przewodność cieplna zależna od składu kompozytu i temperatury (Poensgen).



3. Wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych

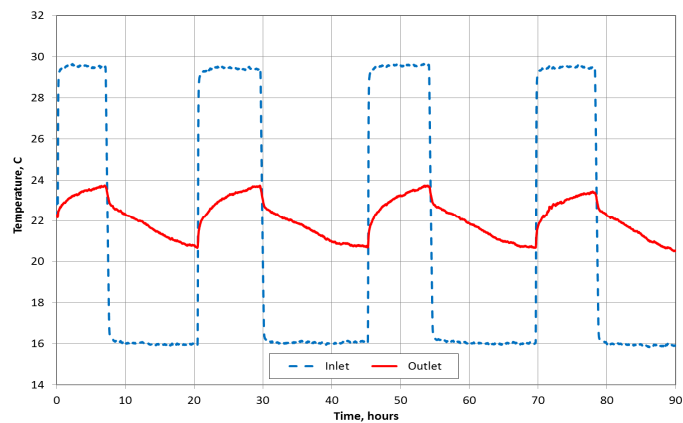


Wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych

Prędkość powietrza: $v = 2 \text{ m/s}$;

Zakres zmian temperatury:

na wlocie: $16.0 \div 29.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (13.5 K) na wylocie: $20.8 \div 23.8 \text{ }^\circ\text{C}$ (3.0 K)



13

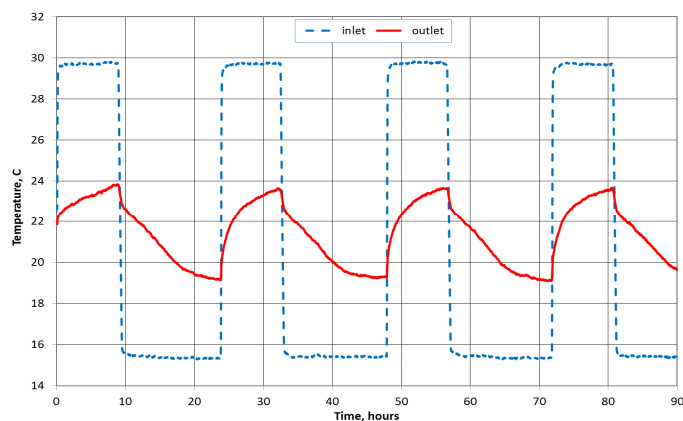


Wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych

Prędkość powietrza: $v = 3 \text{ m/s}$;

Zakres zmian temperatury:

na wlocie: $15.3 \div 29.7 \text{ }^\circ\text{C}$ (14.4 K) na wylocie: $19.2 \div 23.7 \text{ }^\circ\text{C}$ (4.5 K)

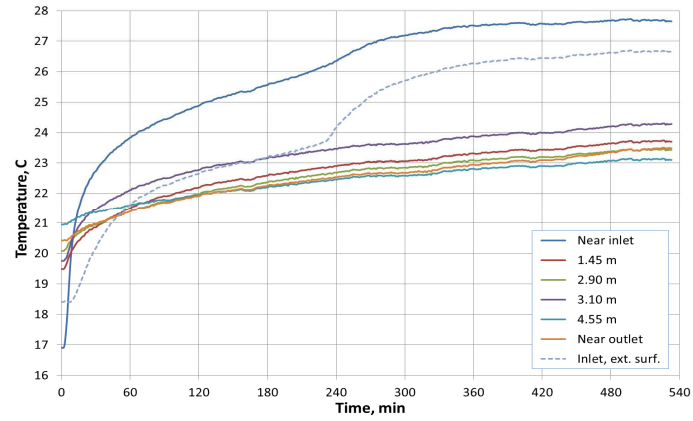


14



Wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych

Temperatura powierzchni kanału
($v = 2$ m/s; cykl grzania #3)

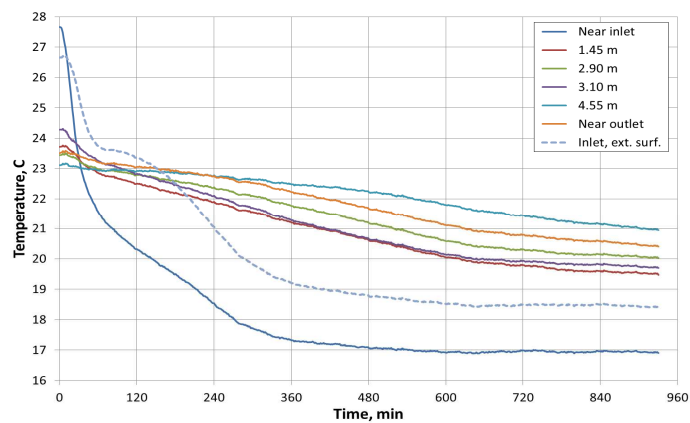


15



Wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych

Temperatura powierzchni kanału
($v = 2$ m/s; cykl chłodzenia #3)

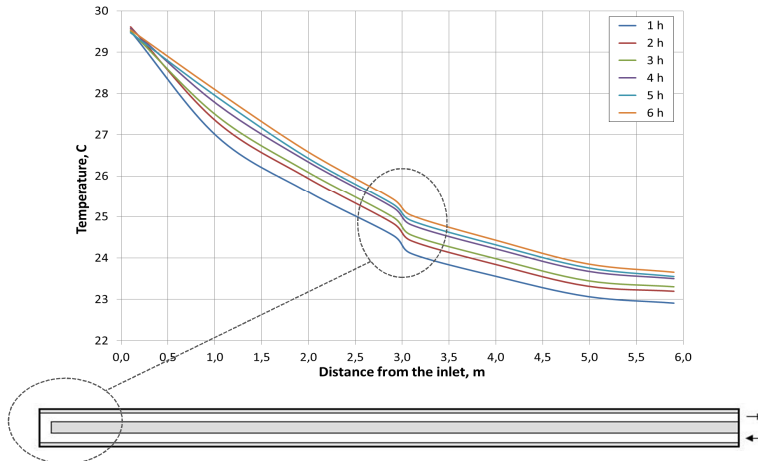


16



Wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych

Zmiany temperatury powietrza wzdłuż kanału
($v = 2 \text{ m/s}$; cykl grzania #3)

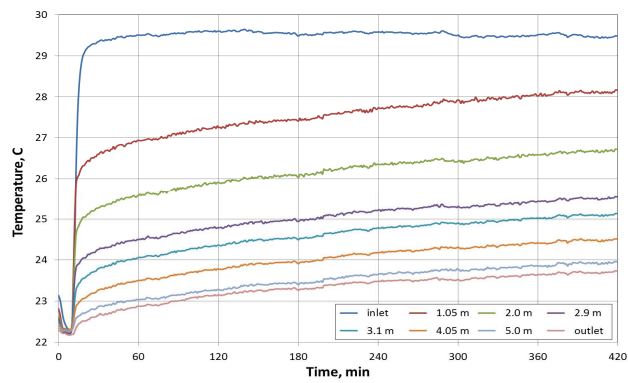


17



Wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych

Zmiany temperatury w czasie



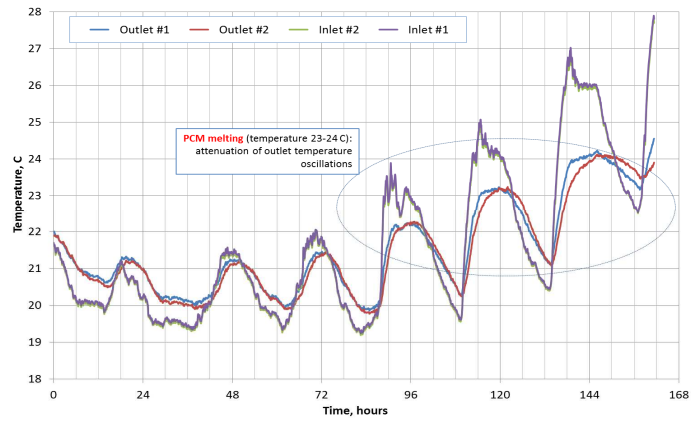
Prędkość powietrza	Przepływ ciepła (po godzinie/ po 8 godzinach)	Zakumulowane ciepło
2 m/s	44,5 W/m² / 35,0 W/m²	1,14 MJ/m²
3 m/s	73,3 W/m² / 55,3 W/m²	1,86 MJ/m²



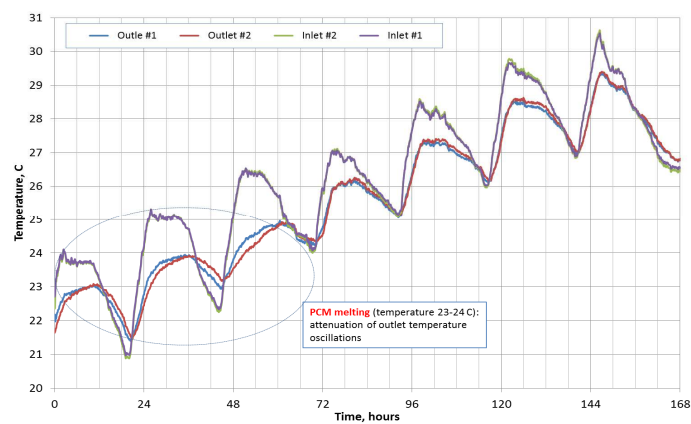
18



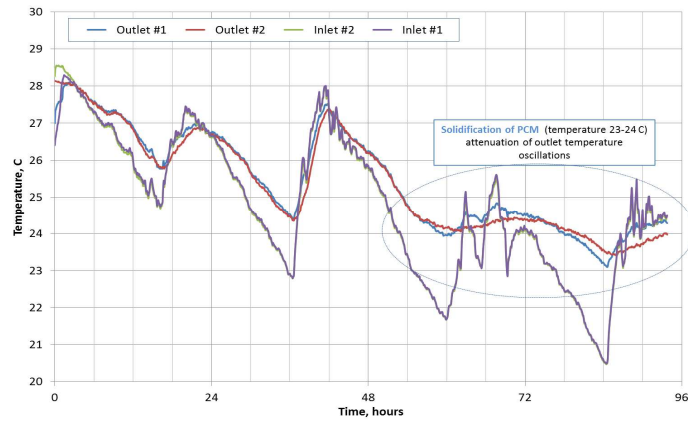
Wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych



Wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych



Wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych



21



4. Model matematyczny i numeryczny



Model matematyczny i numeryczny

Cele

- Budowa modelu matematycznego i numerycznego opisującego pracę kanału wentylacyjnego oraz jego walidacja i weryfikacja,
- Zastosowanie modelu matematycznego i numerycznego do optymalizacji kanału wentylacyjnego (dobór: grubości ścianek, rozkładu i zawartości PCM, temperatury przemiany fazowej itd.).



Koncepcja modelowania

Pełne trójwymiarowe modelowanie nieustalanej wymiany ciepła w kanale wentylacyjnym

- Bardzo czasochłonne i duże zapotrzebowanie na dużą moc obliczeniową oraz pamięć RAM – większość zasobów przeznaczona na obliczenia 3D przepływu powietrza (gęsta siatka po stronie powietrza w pobliżu ścianek kanału, modele turbulencji, mały krok czasowy, bardzo dużo kroków czasowych),
- Mało użyteczny w procesie optymalizacji (bardzo długi czas obliczeń ~ dni).



Nowa koncepcja modelu numerycznego

- 3D obliczenia wymiany ciepła na drodze przewodzenia ze zmianą fazy w ściankach panelu,
- 1D obliczenia wymiany ciepła w powietrzu przepływającym przez kanał zasobnika.

Nowy model znacznie zredukował czas obliczeń oraz zapotrzebowanie na pamięć RAM (krótki czas obliczeń ~ minut).



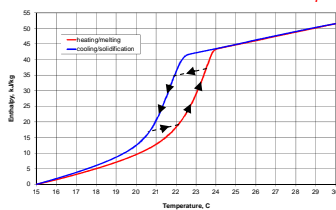
Model matematyczny

3D równanie przewodzenia ciepła z uwzględnieniem zmiany fazy opisujące przepływ ciepła w ściankach modułu wentylacyjnego wykonanego z kompozytu gips-PCM:

$$\rho c_p (T, \text{ history of } T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \lambda (T) \nabla T$$

Warunki brzegowe

- górna ścianka zewnętrzna: $q_e = \alpha_e (T_\infty - T_w)$,
- ścianki: czołowa, tylna, dolna i boczne: $q_e = 0$,
- ścianki kanałów: $q_i = \alpha_i [T_a(x) - T_w(x)]$ – ten warunek sprzęgał modele 3D i 1D, konieczność oszacowania α_i .



Ciepło właściwe c_p zostało określone na podstawie krzywej eksperymentalnej entalpia-temperatura z zależności: $c_p = \partial H / \partial T$.



Model matematyczny

1D konwekcyjno-dyfuzyjne równanie energii dla powietrza:

$$c_{p,a} \rho_a \frac{\partial T_a}{\partial t} + c_{p,a} \rho_a u \frac{\partial T_a}{\partial x} = \lambda_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \frac{P_c}{A_c} \alpha_i (T_a - T_w)$$

Warunki brzegowe

- wlot do kanału: $T(x=0) = T_{in}$,
- wylot z kanału: $\partial T / \partial x (x=L) = 0$.

Sprzężenie z równaniem 3D przewodzenia ciepła w ściankach panelu, konieczność oszacowania α_i .

Nieznaną, średnią temperaturę ścianek kanału T_w była wyznaczana (w każdej iteracji) z wykorzystaniem rozwiązań równań 1D i 3D z warunku: $\alpha_i [T_a(x) - T_w(x)] = -\lambda \partial T / \partial x$.

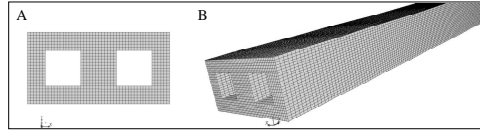
Warunki początkowe

Jednorodny rozkład temperatury w panelu i w powietrzu: $T(t=0) = T_{init}$

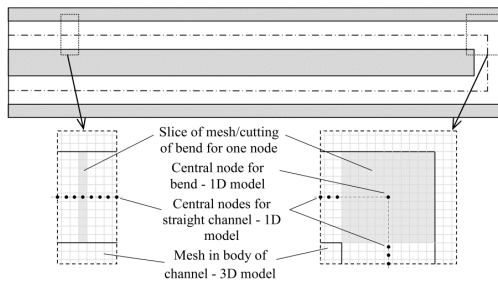


Model numeryczny

Siatka 3D wygenerowana w ściankach kanału



Siatka 1D dla powietrza i jej powiązanie z siatką 3D



Jeden element w powietrzu o objętości $\Delta V_c = \Delta x A_c$ odpowiadał wycinkowi siatki 3D o szerokości Δx .

Na kolankach zastosowano tylko jeden element siatki dla powietrza.



27



Model numeryczny

Oba równania 1D i 3D rozwiązano w ANSYS Fluent 14.0:

- Trójwymiarowe równanie przewodzenia zaimplementowano poprzez równanie skalarne (UDS) z dodatkowo zmodyfikowanym członem nieustalonym (uwzględnienie zmiennego c_p – zależność od temperatury i historii jej zmian, **UWAGA: DEFINE_SPECIFIC_HEAT dla standardowego równania energii w Fluent pozwala uwzględnić zależność c_p tylko od temperatury**),

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = S \quad \text{gdzie: } \begin{cases} \phi = c_p T, \\ \Gamma = \lambda / c_p, \\ S = 0 \end{cases}$$

Makro DEFINE_UDS_UNSTEADY: $\partial(\rho\phi)/\partial t = \rho c_p \partial T / \partial t$.

- Jednowymiarowe równie energii dla powietrza – makra UDF, UDM i dodatkowe funkcje,
- Procedura do śledzenia ewolucji c_p – makra UDF, UDM i dodatkowe funkcje.



28



Model numeryczny

Schemat prowadzenia obliczeń w jednym kroku czasowym

- **Krok 1:** rozwiązanie trójwymiarowego równania przewodzenia ciepła w ściankach kanału,
- **Krok 2:** wyznaczenie średniej temperatury ścianek kanału w przekrojach odpowiadających elementom siatki dla powietrza z rozwiązania równania 3D,
- **Krok 3:** rozwiązanie jednowymiarowego równania energii dla powietrza,
- **Krok 4:** wyznaczenie nowej temperatury ścianek kanału w przekrojach odpowiadających elementom siatki dla powietrza (z rozwiązania równań 1D i 3D – bilans energii na ściankach wewnętrznych),
- **Krok 5:** wyznaczenie nowych wartości c_p ,
- **Krok 6:** powtórzenie kroków 1-5, jeżeli uzyskano zbieżność obliczeń \Rightarrow nowy krok czasowy.



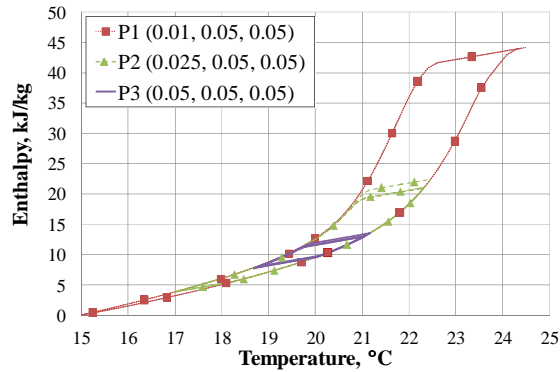
5. Wyniki obliczeń



Walidacja

Sprawdzenie poprawności odtworzenia krzywej entalpia-temperatura

- Obliczenia w kostce o wymiarach 0.1×0.1×0.1 m,
- Na jednej ścianie warunek brzegowy zmienił się zgodnie z zależnością:
 $T(t) = 20 - 7 \sin(2\pi t/3600/24)$ [°C],
- Rejestrowanie zmian temperatury i entalpii w kilku punktach kostki.



Walidacja

Porównanie rozkładu temperatury powietrza przepływającego przez kanał o stałej temperaturze ścianek

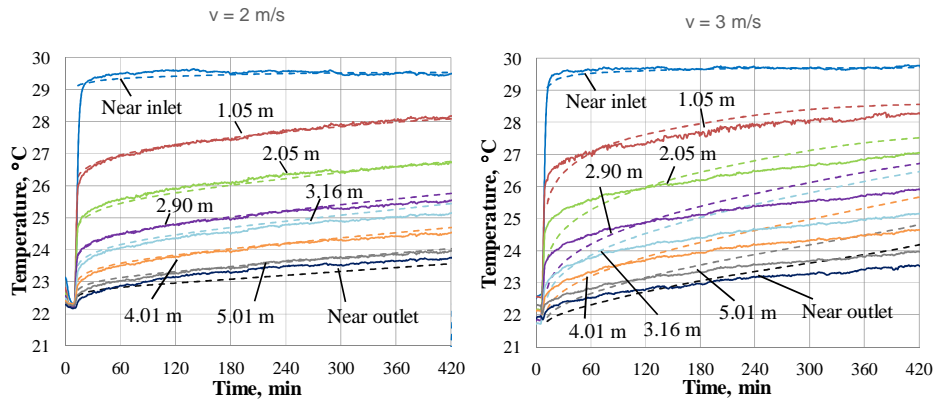
Rozwiązanie analityczne:

$$T(x) = T_{in} - (T_w - T_{in}) \exp\left(-h_i P_c x / \rho_a A_c u_{in} c_{p,a}\right)$$

Mesh size $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ [m]	Relative error ε			
	Heating		Cooling	
	upwind	linear upwind	upwind	linear upwind
$0.00500 \times 0.00500 \times 0.0100$	$2.19 \cdot 10^{-2}$	$6.81 \cdot 10^{-5}$	$2.30 \cdot 10^{-5}$	$1.04 \cdot 10^{-7}$
$0.00250 \times 0.00250 \times 0.0050$	$2.34 \cdot 10^{-5}$	$8.18 \cdot 10^{-8}$	$2.31 \cdot 10^{-5}$	$5.84 \cdot 10^{-8}$
$0.00125 \times 0.00125 \times 0.0025$	$1.70 \cdot 10^{-5}$	$7.45 \cdot 10^{-8}$	$1.66 \cdot 10^{-5}$	$5.17 \cdot 10^{-8}$



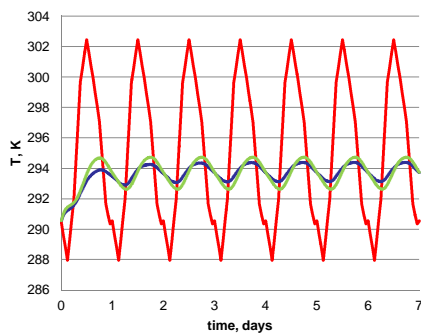
Wstępna weryfikacja eksperymentalna



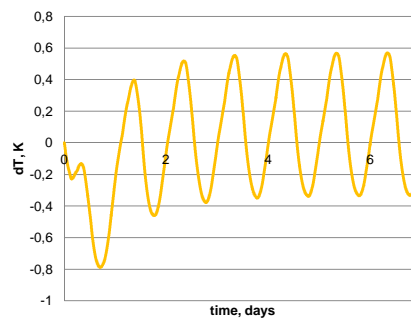
33



Symulacja cyklu pracy zasobnika



Zmiany temperatury na wlocie (linia czerwona) oraz wylocie z kanału wykonanego z kompozytu gips-PCM (niebieska) i na wylocie z kanału wykonanego z materiału o stałym c_p (zielona).



Zmiany różnicy temperatury powietrza na wylocie dla zasobnika wykonanego z kompozytu gips-PCM oraz dla zasobnika wykonanego z materiału o stałym c_p .



34



6. Wnioski



Wnioski

- W prezentacji przedstawiono koncepcję kanału wentylacyjnego wykonanego z kompozytu gips-PCM,
- Dla zaproponowanego rozwiązania wykonano stanowisko pomiarowe i przeprowadzono pomiary w warunkach laboratoryjnych,
- Opracowano również model matematyczny oraz obliczeniowo efektywny model numeryczny kanału wentylacyjnego, który może zostać wykorzystany w procesie optymalizacji zaproponowanego układu wentylacyjnego,
- Wykonano walidację i wstępną weryfikację zaproponowanego modelu matematycznego i numerycznego.

