

BADANIA LABORATORYJNE CIEPLNEGO FUNKCJONOWANIA PRZEGRÓD KOLEKTOROWO - AKUMULACYJNYCH MODYFIKOWANYCH MATERIAŁEM ZMIENNO-FAZOWYM

Lech LICHOLAI, Joanna KRASOŃ

*Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego
ul. Poznańska 2, 35-955 Rzeszów, e-mails: Lech.Licholai@prz.edu.pl, jkras@prz.edu.pl*

Streszczenie: Współczesne budownictwo powinno charakteryzować się niezawodnością konstrukcyjną oraz dbałością o niskie zużycie energii. Czynniki te mają szczególne znaczenie w zapewnieniu komfortu użytkownika różnych budynków. W ramach komfortu cieplnego, ważnym jest, zwrócenie uwagi na zagadnienia dotyczące energooszczędnego projektowania zewnętrznych przegród budowlanych. Jednym z interesujących rozwiązań jest możliwość wkomponowywania w strukturę budynku innowacyjnych przegród budowlanych pozyskujących energię promieniowania słonecznego do poprawy bilansu cieplnego rozpatrywanego obiektu. W ramach niniejszego opracowania autorzy podjęli próbę modyfikacji przegrody kolektorowo – akumulacyjnej poprzez dodatkowe zastosowanie zmiennofazowej warstwy materiałowej. Dla jednego z dwóch wariantów wprowadzono dodatkowo warstwę izolacji aerożelowej. Prowadzone badania laboratoryjne pozwalają określić wpływ tej izolacji na ograniczenie strat ciepła w przegrodzie, w której zastosowano przeszklenie o niskiej izolacyjności termicznej.

Słowa kluczowe: fizyka budowli, przegrody kolektorowo – akumulacyjne, materiały zmiennofazowe, przepływ ciepła, aerożel

1. WSTĘP

Badania dotyczące zastosowania materiałów zmienno-fazowych w przegrodach budowlanych prowadzone są w różnych ośrodkach naukowych w ujęciu teoretycznym jak i praktycznym. W artykule [1] przedstawiono analizę cieplną dla budynku funkcjonującego w gorącej strefie klimatycznej. Ściany tego budynku zrealizowano z cegieł o wymiarach 0.25 m x 0.15 m x 0.15 m. Rozpatrzono cztery przypadki badawcze. W trzech przypadkach w ceglach znajdowały się cylindryczne otwory (od 1 do 3) o średnicy 0,03 m, do których aplikowano różne materiały fazowo

zmiennie (n-octadecane, n-eicosane, and P116), w czwartym przypadku poddano analizie ścianę z cegieł pełnych. Efektywność cieplną analizowanych systemów oceniano na podstawie wielkości przepływu strumienia ciepła na wewnętrznych powierzchniach badanych przegród. Rozważania dotyczące zastosowania mikrokapsułkowanego materiału zmiennofazowego o temperaturze topnienia 26°C jako dodatkowego składnika mieszanki betonowej zawiera artykuł [2]. Wykonano dwa obiekty badawcze w postaci zewnętrznych komór o wymiarach 2,6 x 2,6 x 2,5 m. Jedna komora posiadała ściany betonowe zmodyfikowane materiałem zmiennofazowym, a druga komora posiadała ściany ze standardowego betonu. Ponadto w dalszych badaniach przekonfigurowano południową obudowę komory, tak, aby spełniała wymagania ściany Trombego. Z uwagi na to, że komory poddawane były długoterminowym, pełnorocznym cykлом badawczym w rzeczywistych warunkach klimatycznych, uzyskane rezultaty dotyczące cieplnego funkcjonowania analizowanych struktur budowlanych należy uznać za interesujące. W pozycji [3] przedstawione są teoretyczne rozważania symulacyjne dotyczące możliwości zastosowania materiałów zmiennofazowych w nieprzezroczystych elementach obudowy budynku. Na podstawie wykonanej analizy stwierdzono, że tak zmodyfikowane przegrody powinny odznaczać się dużą izolacyjnością termiczną, wymaganą dla prawidłowego, energetycznego funkcjonowania elementu obudowy wyposażonego w materiał zmiennofazowy.

W artykule [4] przedstawiono analizę numeryczną dotyczącą magazynowania energii cieplnej w materiałach fazowo zmiennych, która dostarczana jest w wyniku promieniowania słonecznego. Analiza została przedsta-

wiona dla warunków klimatu umiarkowanego i obejmowała dwa przypadki budynków różniących się konfiguracją przegród zewnętrznych. Przypadek pierwszy to budynek bardzo oszklony, natomiast przypadek drugi to budynek wyposażony w naturalnie wentylowane pasywne przegrody zewnętrzne. Materiał fazowo zmienny w pierwszym przypadku umieszczony był w wewnętrznych ściennych okładzinach gipsowo-kartonowych natomiast w drugim przypadku został umieszczony od strony zewnętrznej w południowo zorientowanych ścianach, osłoniętych przezroczystym materiałem izolacyjnym. Efektem przeprowadzonych symulacji numerycznych są zamieszczone wyniki wraz z dyskusją, która zachęca do dalszych badań w tym obszarze. Natomiast w artykule [5] przedstawione zostały rozważania doświadczalne i teoretyczne dotyczące cieplnego funkcjonowania ścian ceramicznych, posiadających w swojej strukturze wewnętrznej materiał fazowo zmienny (PCM). Głównym celem badań doświadczalnych była ocena wpływu zastosowanego materiału fazowo zmiennego w zewnętrznych ścianach ceramicznych na zmniejszenie i spowolnienie wahań temperatury w wewnętrznych pomieszczeniach. Wyniki tych badań pozwoliły na kalibrację i walidację modelu numerycznego, wprowadzając różne ilości materiału fazowo zmiennego do wnętrza przegrody w kontekście poprawy temperaturowej stabilności w przyległym do ściany pomieszczeniu. Wykonane badania wykazały, że wahania temperatur w pomieszczeniu zmniejszyły się o 5°C z równoczesnym wzrostem opóźnienia czasowego o 3 godziny. Autorzy zwracają uwagę na potrzebę dalszych badań w kontekście optymalizacji ilości i temperatury topnienia materiałów zmiennofazowych stosowanych w ceramicznych ścianach zewnętrznych w różnych strefach klimatycznych jak również techniczno-ekonomicznych rozważań na potrzeby budownictwa pasywnego.

Przytoczone powyżej publikacje są wybranymi spośród wielu istniejących w tym obszarze nauki, ich merytoryczna zawartość skłania do podejmowania kolejnych badań.

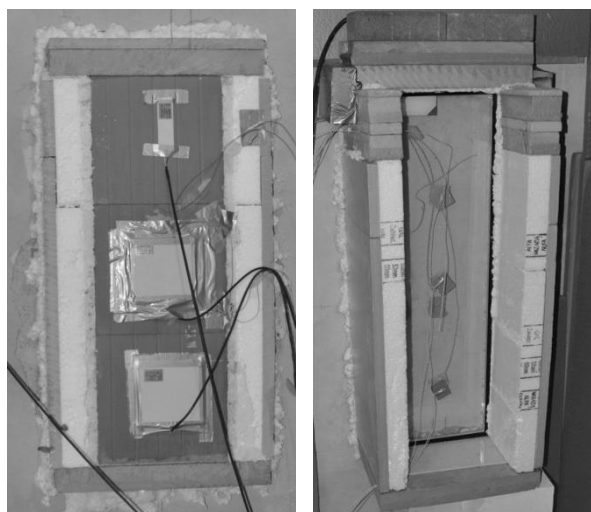
2. METODYKA BADAŃ

Badania zmodyfikowanej przegrody kolektorowo - akumulacyjnej przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, w zestawie badawczym składającym się z dwóch komór, z których jedna symuluje zewnętrzne warunki temperaturowe (tzw. komora zimna), a druga warunki panujące w ogrzewanych pomieszczeniach wewnętrznych (tzw. komora ciepła). Pomiędzy komory wprowadzono zaprojektowaną przegrodę kolektorowo – akumulacyjną. (rys. 1). Ze względu na zastosowanie w przegrodzie przeszklenia o słabej izolacyjności cieplnej (wykorzystując równocześnie jak największą wartość współczynnika

przepuszczalności promieniowania słonecznego), dodatkowo wprowadzono warstwę pełnej izolacji aerożelowej.

Celem tych badań było określenie wpływu dodatkowej izolacji termicznej na ograniczenie strat ciepła w przegrodzie kolektorowo – akumulacyjnej w okresach pozbawionych promieniowania słonecznego.

W zakresie badań określano wartość temperatury w warstwie PCM oraz rozkład temperatur w części murowej pod wpływem ciepła oddanego przez materiał zmiennofazowy i dodatkowej warstwy izolacyjnej. Równocześnie rejestrowano przepływ gęstości strumienia ciepła na powierzchni ściany ceramicznej od strony komory ciepłej.



Rys. 1. Widok badanej przegrody od strony ciepłej i zimnej.
Fig. 1. View of the testing barrier from hot and cold side.

W komorze zimnej podczas prowadzonych badań w dwóch cyklach pomiarowych, założono stabilizację temperaturową o wartościach -10°C oraz 0°C . Do odwzorowania wielkości promieniowania słonecznego padającego na pionową, kolektorową powierzchnię wykorzystano płytę grzewczą. Wartość całkowitego, docierającego promieniowania słonecznego przyjęto na poziomie około $590\text{W}/\text{m}^2$, jako maksymalną średnią dnia z całego sezonu grzewczego, czyli od początku października do końca kwietnia. Dane promieniowania słonecznego przyjęto z typowego roku meteorologicznego dla stacji Rzeszów-Jasionka. W komorze ciepłej założono stałą temperaturę $+20^{\circ}\text{C}$. Na powierzchniach obudowy ściany oraz w każdej warstwie zostały umieszczone czujniki pomiaru temperatury. Na powierzchni ściany ceramicznej od strony ciepłej umocowano czujniki gęstości strumienia ciepła. Ponadto kontrolowano temperatury powietrza w obydwóch komorach na założonych, stabilizowanych wartościach.

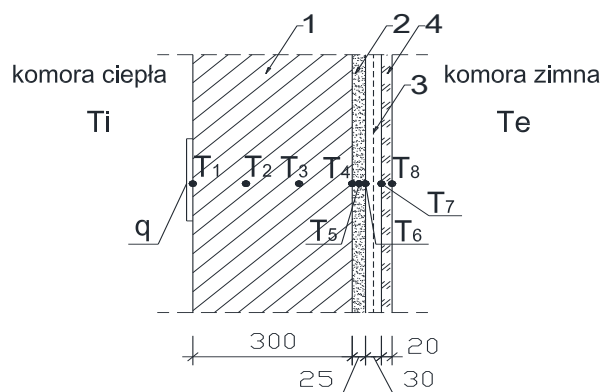
W badaniach przeprowadzono symulację wartości promieniowania słonecznego poprzez nagrzewanie ściany płytą grzejną w przedziale sześciu godzin. Płyta posiadająca maksymalną moc grzewczą do 640 W/m^2 została umieszczona pomiędzy warstwą przeszklenia a warstwą materiału zmienno-fazowego. Wartość mocy grzewczej przyjęto na poziomie około 465 W/m^2 , po uwzględnieniu wartości współczynnika przepuszczalności całkowitego promieniowania słonecznego przez powierzchnię przeszkloną przymocowaną od strony zewnętrznej oraz współczynnika absorpcji ściany. Po każdym cyklu nagrzewania analizowano wartości temperatur - przejście fali termicznej przez kolejne warstwy przegrody, aż do uzyskania poziomu początkowego przed rozpoczęciem nagrzewania.

2.1. Rodzaj badanej przegrody

Przegrodę zaprojektowano w postaci zmodyfikowanej ściany kolektorowo – akumulacyjnej o wymiarach powierzchni $0,25 \times 0,75 \text{ m}$. Rdzeń przegrody zrealizowano z ceramiki poryzowanej o grubości $0,3 \text{ m}$. Od strony zimnej wprowadzono warstwę wykonaną z materiału zmienno-fazowego grubości $0,025 \text{ m}$. Aby umożliwić symulację całkowitego promieniowania słonecznego za warstwą PCM umieszczono płytę grzewczą.

Od strony zimnej badaną przegrodę zamknięto warstwą przeszklenia. Przeszklenie dobrano pod względem możliwości uzyskania jak największej przepuszczalności promieniowania słonecznego. Wykorzystano szybę zwykłą, której współczynnik całkowitej przepuszczalności g wynosi 83% , natomiast współczynnik przenikania ciepła U jest na poziomie $2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$. W niektórych wariantach badawczych zastosowano warstwę izolacji aerożelowej o grubości $0,01 \text{ m}$. Izolacje wprowadzano między warstwą PCM a przeszkleniem, po zakończeniu dostarczenia energii cieplnej od płyty grzewczej symulującej naturalne procesy energetyczne od promieniowania słonecznego.

Warstwy przegrody wraz z usytuowaniem czujników temperatury T_i oraz czujników gęstości strumienia ciepła q przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zmodyfikowana przegroda kolektorowo – akumulacyjna, składająca się z warstw: 1 – ściana ceramiczna, 2 – PCM, 3 – pustaka powietrzna z izolacją aerożelową, 4 – przeszklenie.
Fig. 2. Modified thermal storage wall, consisting of layers: 1 - ceramic wall, 2 - PCM, 3 - air gap with aerogel insulation, 4 - glazing.

Właściwości poszczególnych materiałów wykorzystanych w przegrodzie przedstawiono w tabeli 1. Wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla PCM oraz izolacji z aerożelu podano na podstawie danych uzyskanych z badań własnych w aparacie do pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła.

Tabela 1. Właściwości poszczególnych materiałów wykorzystanych w badanych przegrodach.

Table 1. The properties of each of the materials used in the studied barriers.

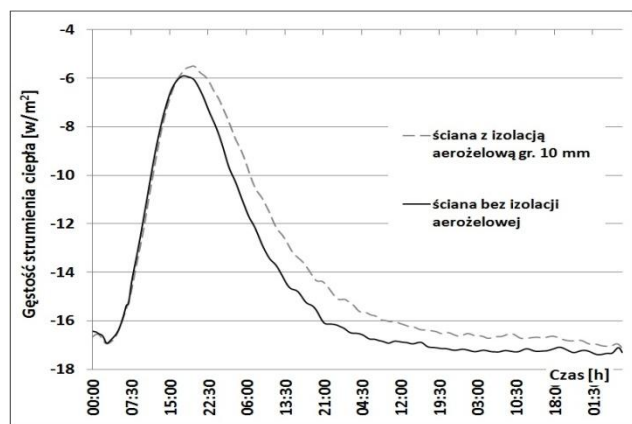
Materiał/właściwości	Pustak ceramiczny	PCM	Aerożel gr. 10mm
Gęstość objętościowa [kg/m ³]	~810	300÷400	150
Temperatura topnienia [°C]	-	25	-
Temperatura krzepnięcia [°C]	-	24	-
Ciepło właściwe [kJ/kgK]	1,0	~ 2,0	~ 2,0
Ciepło utajone [kJ/kg]	-	100	-
Współczynnik przewod. ciepła [W/mK]	0,2	0,076	0,018

3. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Wartości gęstości strumienia ciepła q na powierzchni ściany ceramicznej oraz temperatury T_i rejestrowano w przedziale od rozpoczęcia nagrzania przegrody (w chwili gdy strumień oraz temperatury były ustabilizowane w przegrodzie) aż do uzyskania strumienia ciepła oraz temperatur początkowych przed nagrzaniem. Badania przeprowadzono dla temperatur -10°C oraz 0°C .

3.1. Analiza przegrody przy temperaturze -10°C

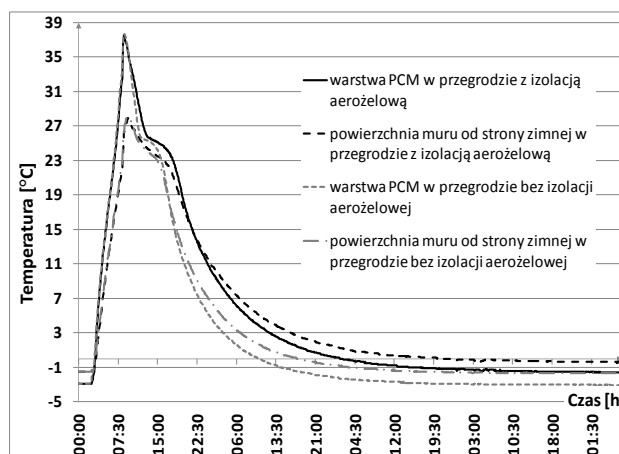
Wartości gęstości strumienia ciepła dla ściany modyfikowanej PCM bez dodatkowej izolacji aerożelowej oraz dla ścian z izolacją aerożelową o grubości 0,01m przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Wykres rozkładu gęstości strumienia ciepła dla badanych przegród z izolacją i bez izolacji aerożelowej (dla $T_e = -10^{\circ}\text{C}$).
Fig. 3. Graph of the heat flow density distribution for the tested barriers insulated with insulation and without aerogel insulation (for $T_e = -10^{\circ}\text{C}$).

Z wartości przedstawionych na wykresie 3 wynika, że nastąpiło zmniejszenie strat ciepła w obu przypadkach, co jest związane z dostarczeniem określonej ilości energii cieplnej do przegrody. Po upływie około 9 godzin od zakończenia nagrzewania, po maksymalnym zmniejszeniu wartości gęstości strumienia ciepła zauważono wzrost strat ciepła w przegrodzie bez dodatkowej izolacji aerożelowej. Natomiast w drugiej przegrodzie zaobserwowano dalszą tendencję zmniejszania strat ciepła, a następnie powolniejszy wzrost tych strat. Po przeanalizowaniu danych uzyskanych dla obu przegród ustalono, że wartość zysków energetycznych przegrody z izolacją aerożelową w stosunku do przegrody bez izolacji wynosi około 5%. Kolejne dwa wykresy (rys. 4 i 5) przedstawiają porównanie wartości temperatur w wybranych miejscach przegrody z zastosowaniem izolacji aerożelowej oraz bez izolacji. Na rys. 4 przedstawiono wielkości rozkładu temperatur w warstwie materiału zmiennofazowego T_5 oraz na

powierzchni ściany ceramicznej T_4 w przegrodzie bez i z izolacją aerożelową. W przegrodzie, w której wykorzystano izolację aerożelową po dostarczeniu energii cieplnej, w warstwie PCM maksymalna temperatura była wyższa o 7,8 K niż w przegrodzie bez izolacji.



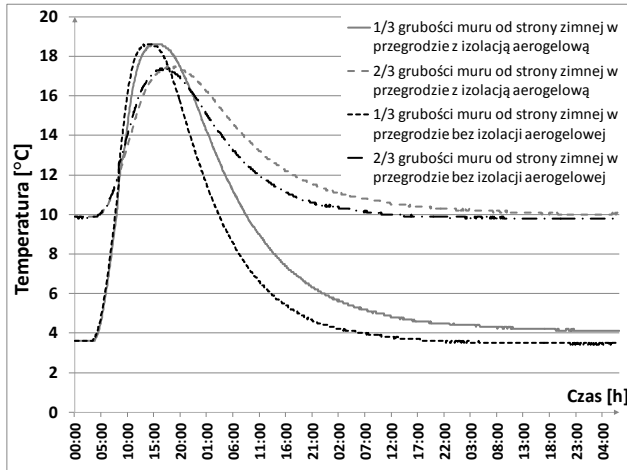
Rys. 4. Wykres rozkładu temperatur na powierzchni elementu ceramicznego oraz w warstwie PCM w modyfikowanej przegrodzie kolektorowo-akumulacyjnej z i bez izolacji aerożelowej (dla $T_e = -10^{\circ}\text{C}$).

Fig. 4. Graph of the temperature distribution on the surface of the ceramic element and in the PCM layer in the modified thermal storage wall with or without aerogel insulation (for $T_e = -10^{\circ}\text{C}$).

Wartość ta wystąpiła po procesie krzepnięcia PCM, czyli po około 9 godzinach od zakończenia dostarczania energii cieplnej (na wykresie widoczne jest charakterystyczne spadku temperatury dla warstwy materiału zmiennofazowego). W tym samym przedziale czasowym różnica temperatur między przegrodami na powierzchni ceramiki wynosiła 5 K. Zauważono również, że w przegrodzie posiadającej izolację, temperatura w warstwie PCM w tym samym analizowanym przedziale czasowym, była wyższa niż na powierzchni muru, natomiast w przegrodzie bez izolacji sytuacja była odwrotna, co świadczy o ograniczeniu strat ciepła w kierunku przeszklenia, dzięki zastosowanej warstwie izolacyjnej. Niższa temperatura w warstwie PCM w stosunku do powierzchni muru w przegrodzie z izolacją pojawiła o około 5 godzin później niż ww. przedziale czasowym.

Na rys. 5 przedstawiono kolejny rozkład temperatur, wewnątrz ściany ceramicznej dla dwóch wariantów badanych przegród. W odległości 1/3 grubości muru od strony zimnej T_3 różnica temperatur w przegrodach wynosiła 2,8 K, natomiast w odległości 2/3 grubości muru T_2 różnica wyniosła około 1,3 K. Zmniejszenie różnicy może wynikać z rodzaju zastosowanego elementu ściennego – pustaka ceramicznego, którego opór cieplny

jest większy niż w przypadku elementów o większej przewodności cieplnej, np. silikatu lub betonu.

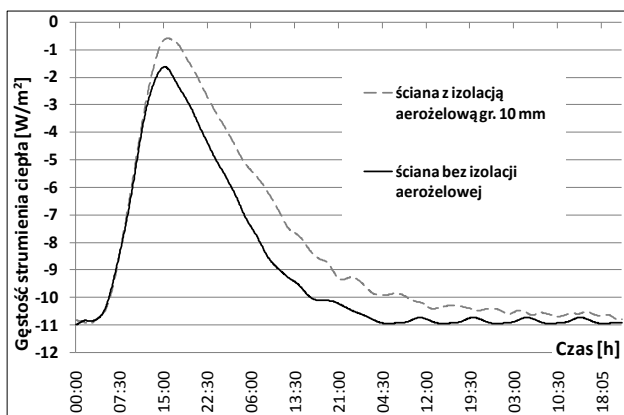


Rys. 5. Wykres rozkładu temperatur w 1/3 oraz 2/3 grubości muru w modyfikowanej przegrodzie kolektorowo - akumulacyjnej z i bez izolacji aerożelowej (dla $T_e = -10^\circ\text{C}$).

Fig. 5. Graph of the temperature distribution in the 1/3 and 2/3 of the wall thickness, in the modified thermal storage wall with and without aerogel insulation (for $T_e = -10^\circ\text{C}$).

3.2. Analiza przegrody w temperaturze 0°C

Rys. 6 przedstawia rozkład wartości gęstości strumienia ciepła dla badanych przegród w temperaturze 0°C.

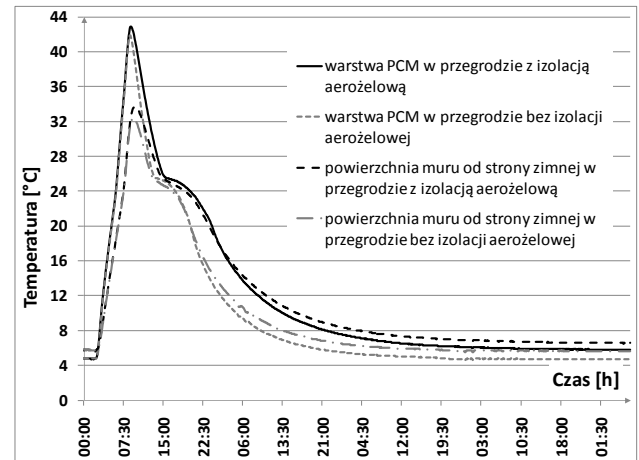


Rys. 6. Wykres rozkładu gęstości strumienia ciepła dla badanych przegród z izolacją i bez izolacji aerożelowej (dla $T_e = 0^\circ\text{C}$).

Fig. 6. Graph of the heat flow density distribution for the tested barriers with and without aerogel insulation (for $T_e = 0^\circ\text{C}$).

Maksymalne zmniejszenie strat w przegrodzie bez izolacji aerożelowej uzyskano po około 7 godzinach od zakończenia procesu dostarczania energii cieplnej do powierzchni absorpcyjnej. W przypadku przegrody

z izolacją, podobnie jak w poprzednim przypadku badawczym ($T_e = -10^\circ\text{C}$) nastąpiło dalsze zmniejszenie strat ciepła. Zysk energii cieplnej między badanymi przegrodami wyniósł około 9,5%, z korzyścią dla przegrody z izolacją aerożelową.



Rys. 7. Wykres rozkładu temperatur na powierzchni elementu ceramicznego oraz w warstwie PCM w modyfikowanej przegrodzie kolektorowo - akumulacyjnej z i bez izolacji aerożelowej (dla $T_e = 0^\circ\text{C}$).

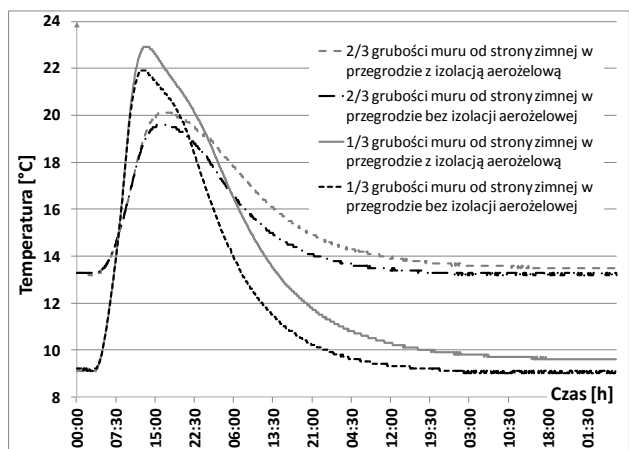
Fig. 7. Graph of the temperature distribution on the surface of the ceramic element and in the PCM layer in the modified thermal storage wall with or without aerogel insulation (for $T_e = 0^\circ\text{C}$).

W podobny sposób przeanalizowano różnice temperatur w poszczególnych miejscach warstwy muru, jak podczas badania w temperaturze -10°C (rys. 7 i 8).

W przegrodzie, w której zastosowano izolację aerożelową, po nagrzaniu w warstwie PCM maksymalna temperatura była wyższa o 6,7 K niż w przegrodzie bez izolacji. Zależność ta również wystąpiła po procesie przemiany fazowej ze stanu ciekłego w stan stały materiału zmienno-fazowego. W tym samym przedziale czasowym różnica temperatur między przegrodami na powierzchni ceramiki wynosiła 5 K.

Wewnątrz muru ceramicznego różnice temperatur wynosiły:

- w odległości 1/3 grubości muru od strony zimnej - 2,5 K,
- w odległości 2/3 grubości muru od strony zimnej - 1,3 K.



Rys. 8. Wykres rozkładu temperatur w 1/3 oraz 2/3 grubości muru w modyfikowanej przegrodzie kolektorowo - akumulacyjnej z i bez izolacji aerożelowej (dla $T_e = 0^\circ\text{C}$).

Fig. 8. Graph of the temperature distribution in the 1/3 and 2/3 of the wall thickness, in the modified thermal storage wall with and without aerogel insulation (for $T_e = 0^\circ\text{C}$).

4. WNIOSKI

Zmniejszenie strat ciepła w przegrodach z izolacją aerożelową w badanych temperaturach wyniosła około 5%, przy temperaturze -10°C w komorze zimnej, a 9,5% w temperaturze 0°C . Z powyższych informacji wynika, że dla przeszklenia posiadającego dużą wartość współczynnika przepuszczalności promieniowania słonecznego i słabą izolacyjność, istnieje możliwość zmniejszenia strat ciepła przez przegrodę, wykorzystując dodatkową izolację termiczną.

Badanie zostało wykonane przy jednym cyklu nagrzewania, zakładając jednodniowe nasłonecznienie, po którym może nastąpić dzień pochmurny. Dla pogłębionej analizy powyższego zagadnienia, istnieje potrzeba przeprowadzenia dalszych badań w długoterminowych cyklach dostarczania energii cieplnej do warstwy absorpcyjnej przegrody, aby uzyskać informację w jaki sposób ilość energii nakładającej się w kolejnych dniach wpłynie na uzyskanie dodatkowych zysków od promieniowania słonecznego oraz wpływu warstwy PCM na ciepłe funkcjonowanie akumulacyjnej warstwy murowej w przegrodzie.

W przegrodach, w których zostały zastosowane dodatkowe izolacyjne warstwy aerożelowe, w części murowej wystąpiły wyższe temperatury oraz wydłużył się czas utrzymywania tych wyższych temperatur aniżeli w przypadku przegród bez dodatkowej izolacji termicznej, niezależnie od warunków ustalonych w komorze zimnej.

W każdej przegrodzie, w warstwie PCM zauważono przemianę fazową, co świadczy o dostarczeniu odpowiedniej porcji energii cieplnej, aby mogła nastąpić

przemiana ze stanu stałego w ciekły i oddanie części energii cieplnej w kierunku elementu murowego.

Badania w ramach niniejszego naukowego obszaru będą kontynuowane zakładając inne cechy charakterystyczne przeszklenia, które mogą mieć wpływ na energetyczną efektywność funkcjonowania materiału zmienno-fazowego.

LABORATORY TESTING OF THE HEAT FUNCTIONING OF MODIFIED PHASE-CHANGE THERMAL STORAGE WALLS

Summary: The contemporary building construction should be characterized by structural reliability and attention to low energy consumption. These factors are particularly important in ensuring comfort in various buildings. In order to ensure thermal comfort it is important to draw attention to issues related to the design of energy-efficient exterior building walls. One of the interesting solutions seems to incorporate building barriers which would absorb solar energy in order to enhance heat balance, into the building structure. In this work an attempt to modify thermal storage wall was made by the employment of the additional phase change material layer. For one of the two options the additional layer of aerogel insulation was incorporated. The conducted laboratory test allow for determining the influence of this insulation on reducing heat loss within a barrier where glazing of low thermal insulating power was used.

Literatura

- [1] Alawadhi Esam M. *Thermal analysis of a building brick containing phase change material*. Energy and Buildings 40 (2008) 351–357
- [2] Cabeza L.F., Medrano M., Castellón C., Castell A., Solé C., Roca J., Nogués M. *Thermal energy storage with phase change materials in building envelopes* Contributions to Science, 3 (4): 501-510 (2007)
- [3] Chwieduk D.A., *Wybrane aspekty stosowania materiałów zmienno-fazowych w przegrodach zewnętrznych w polskich warunkach klimatycznych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, z. 59 (2/2012/II): 123-130 (2012)
- [4] Heim D. *Isothermal storage of solar energy in building construction*. Renewable Energy 35 (2010) 788-796
- [5] Silva T., Vicente R., Soares N., Ferreirac V. *Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution*. Energy and Buildings 49 (2012) 235-245