

Lech LICHOLAI¹
Joanna KRASOŃ²
Przemysław MIĄSIK³
Aleksander STARAKIEWICZ⁴

UDZIAŁ MATERIAŁU ZMIENNO-FAZOWEGO W PRACY ENERGETYCZNEJ PRZEGRODY KOLEKTOROWO-AKUMULACYJNEJ W PRZEJŚCIOWYCH WARUNKACH KLIMATYCZNYCH

W artykule przedstawiono analizę wybranych parametrów cieplnego funkcjonowania przegrody kolektorowo-akumulacyjnej modyfikowanej materiałem zmienno-fazowym. Badania przeprowadzono w komorze zewnętrznej w miesiącu kwietniu, uwzględniając rzeczywiste warunki klimatyczne: wartość promieniowania słonecznego i temperaturę zewnętrzną powietrza. W celu porównania wyników wykonano przegrodę referencyjną bez udziału materiału zmienno-fazowego. Podczas badań w komorze stabilizowano temperaturę wewnętrzną na poziomie 20°C. W badanej przegrodzie materiał zmienno-fazowy został wkomponowany w ścienny element ceramiczny, którym wypełniono połowę jego przestrzeni. Materiał ten usytuowano od strony zewnętrznej elementu, w celu uzyskania odpowiedniej temperatury wystarczającej do wystąpienia procesu przemiany fazowej. Przegroda kolektorowo-akumulacyjna posiada przeszklenie o współczynniku przenikania ciepła $U = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Analizując wpływ materiału zmienno-fazowego, autorzy przedstawili i porównali wartości gęstości strumienia ciepła na powierzchni przegród od strony wewnętrznej. Celem badań było określenie wpływu wartości promieniowania słonecznego na modyfikowaną przegrodę kolektorowo-akumulacyjną, w okresie przejściowym, w którym zazwyczaj występują zmienne warunki klimatyczne. Umieszczenie PCM od strony zewnętrznej w elementach ceramicznych, jako składowej przegród kolektorowo-akumulacyjnych, jest jednym z wariantów w prowadzonych badaniach. Dalszej analizie poddane zostaną inne rozwiązania usytuowania materiału zmienno-fazowego, w celu wybrania najkorzystniejszego wykorzystania tego materiału.

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Lech Licholai, Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651702; lechlich@prz.edu.pl

² Joanna Krasoń, Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651728; jkras@prz.edu.pl

³ Przemysław Miąsik, Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651327; pmiasik@prz.edu.pl

⁴ Aleksander Starakiewicz, Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651428; olekstar@prz.edu.pl

Słowa kluczowe: PCM, ceramika, ściana kolektorowo-akumulacyjna, promieniowanie słoneczne, strumień ciepła

1. Wprowadzenie

Stosowanie materiałów zmienno-fazowych w zewnętrznych ścianach budynków, ma na celu zmniejszenie wahań temperaturowych między powietrzem zewnętrznym a wewnętrznym, w pomieszczeniach budynku. Badania potwierdzające korzystny wpływ materiałów zmienno-fazowych, prowadzone są w różnych ośrodkach naukowych. Jednak znaczący wpływ na możliwości wykorzystania PCM ma występujący klimat na danym obszarze. W gorącym klimacie, w okresie letnim przy występujących wysokich temperaturach, PCM ma za zadanie ograniczyć przepływ energii cieplnej do wewnątrz pomieszczeń. Alawadhi [1] w swoim artykule przedstawił analizę termiczną wykorzystując dwuwymiarowy model dla budynku wykonanego z cegły wypełnionej materiałem zmienno-fazowym. PCM został umieszczony w otworach cylindrycznych m.in. w środkowej części elementu. W badaniach uwzględniono lokalizację, rodzaj i ilość PCM. Wyniki potwierdzają redukcję strumienia ciepła o 17,55% na powierzchni wewnętrznej ściany, przy lokalizacji PCM w środkowej części elementu oraz trzech cylindrach wypełnionych materiałem zmienno-fazowym.

Obszar Morza Śródziemnego charakteryzuje się również w okresie pór ciepłych wysokimi temperaturami, co przyczynia się do zwiększenia zapotrzebowania na energię chłodzącą. Principi i Fioretti [2] w artykule przedstawili między innymi wyniki badań doświadczalnych oraz teoretycznych ściany ceramicznej wypełnionej materiałem zmienno-fazowym. PCM został wprowadzony do jednej szczeliny pustaka od strony zewnętrznej. Pozostałe szczeliny pozostawiono bez zmian. Podczas dobowej analizy stwierdzono zmniejszenie wahań w przepływie ciepła do wewnątrz pomieszczenia o około 25% i opóźnienie maksymalnego przepływu ciepła o około 6 godzin. Średni błąd między badaniami teoretycznymi a doświadczalnymi wynosił 4,6%. Autorzy również potwierdzili, że warunki klimatyczne, rodzaj PCM, oraz warunki wewnętrzne mają znaczący wpływ na zachowanie się materiału zmienno-fazowego.

Silva i Vicente [3] porównali w warunkach laboratoryjnych ścianę ceramiczną izolowaną termicznie ze ścianą modyfikowaną materiałem zmienno-fazowym, izolowaną termicznie oraz bez izolacji. Materiał zmienno-fazowy został umieszczony w pojemniku stalowym i wprowadzony do elementu murowego. Badania były prowadzone przez osiem dni z założonymi warunkami zewnętrznymi występującymi w Portugalii. Wyniki potwierdziły zmniejszenie wahań temperatury w ścianie z PCM. Największa redukcja o 80% wystąpiła w ścianie z materiałem zmienno-fazowym i izolacją termiczną. Równocześnie nastąpiło przesunięcie maksymalnej temperatury o trzy godziny w porównaniu ze ścianą bez PCM.

Wang i inni [4] w swoim artykule przedstawili wyniki badań porównawczych przeprowadzonych w warunkach polowych, dla trzech pór roku w Szanghaju. Badania zostały przeprowadzone w komorze zewnętrznej o wymiarach 3,25 m x 3,86 m x 2,91 m, w której porównano ścianę modyfikowaną materiałem zmienno-fazowym do ściany wykonanej z cegły ceramicznej. Zawartość PCM w cegle wynosiła 70%. W okresie letnim stwierdzono, że temperatura na powierzchni ściany wewnętrznej zmniejszyła się 0,2°C i wystąpiła o około 2 h później niż w tradycyjnej ścianie. W przypadku okresu jesienno, temperatury w ścianie występowały w zakresie przemiany fazowej PCM oraz wahania temperatur zostały znacznie zredukowane. W okresie zimowym nastąpiła redukcja ogrzewania w przedziale od 10 ÷ 30%.

W klimacie umiarkowanym, okres przejściowy charakteryzuje się znacznymi wahaniami temperatur, co wpływa niekorzystnie na komfort termiczny w pomieszczeniach w budynku. Zastosowanie materiałów zmienno-fazowych w strukturze ściany zewnętrznej ma na celu zmniejszenie fluktuacji temperatur.

Heim [5] w artykule przedstawił między innymi analizę symulacji komputerowej przegrody zewnętrznej, składającej się z kompozytu ceramicznego i PCM oraz warstwy transparentnej umieszczonej od strony zewnętrznej. Przegroda została usytuowana na elewacji południowej rozważanego budynku. Do analizy wybrano parametry zewnętrzne od początku marca do końca listopada dla miasta Warszawa. W wyniku analizy Autor stwierdził, że najlepszy efekt zmniejszenia wahań temperatur uzyskano w okresie przejściowym, czyli wiosną i jesienią. Również w zimie widoczny jest efekt akumulacji ciepła utajonego. Nie zauważono efektu wpływu PCM na przegrodę w okresie letnim.

W powyższych szerokościach geograficznych również proponuje się zastąpienie części grubości elementów masywnych w przegrodzie zewnętrznej, materiałami zmienno - fazowymi. W artykule [6] Chwieduk przedstawiła symulację numeryczną przegrody zewnętrznej złożonej z kilku warstw, w strukturę której wprowadzono panel PCM. Parametry zewnętrzne przyjęto dla 12 dni uśrednionych z całego roku dla Warszawy. W analizie porównano przegrody, w których założono od zewnątrz warstwę konstrukcyjną lub termoizolacyjną oraz od wewnątrz płytę z PCM gr. 1 cm. Analiza wykazała, że warstwa izolacji termicznej gr. 25 cm z panelem PCM gr. 1,5 cm może dać podobny komfort cieplny w pomieszczeniu, jak tradycyjna ściana zewnętrzna złożona z warstwy pustaka ceramicznego gr. 25 cm oraz izolacji termicznej gr. 20 cm.

Podobną analizę z wykorzystaniem paneli PCM przeprowadzono dla przegród zewnętrznych przezroczystych. W artykule [7] Chwieduk stwierdziła, że dla warunków występujących w Polsce w warstwie PCM w okresie zimowym nie zaistniały warunki dla przemiany fazowej. Alternatywą dla przeszklenia w przypadku stosowania kompozytów PCM w przegrodzie zewnętrznej przezroczystej, może być izolacja transparentna.

W artykule [8] Musiał przedstawił wyniki badań wpływu rolety wewnętrznej, modyfikowanej materiałem zmienno-fazowym, usytuowanej za przegrodą

przezroczystą. Badania potwierdzają obniżenie szczytowych wartości temperatury w przestrzeni, znajdującej się za badaną roletą.

Przedstawione przykłady zastosowania PCM w różnych warunkach klimatycznych skłaniają do dalszych badań z wykorzystaniem materiałów zmienno-fazowych, również na obszarze Polski.

2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono w jednej z komór badawczych, usytuowanych na terenie Politechniki Rzeszowskiej (Rys.1). W komorze od strony południowej, wykonano dwie przegrody kolektorowo - akumulacyjne, z których jedna została zmodyfikowana materiałem zmienno-fazowym. Przegrody o wymiarach $0,5 \times 1,5$ m zostały oddzielone od siebie izolacją termiczną (Rys.2). W komorze stabilizowano temperaturę wewnętrzną na poziomie 20°C . Parametry zewnętrzne wykorzystane do analizy przedmiotowej przegrody (m.in. całkowite promieniowanie słoneczne, temperatura zewnętrzna), rejestrowano w stacji meteorologicznej, usytuowanej w pobliżu badanej komory. Do analizy zostały uwzględnione dane z okresu przejściowego miesiąca kwietnia 2016 roku.



Rys. 1. Zewnętrzne komory badawcze na terenie Politechniki Rzeszowskiej

Fig. 1. External test chambers in the University Technology of Rzeszow



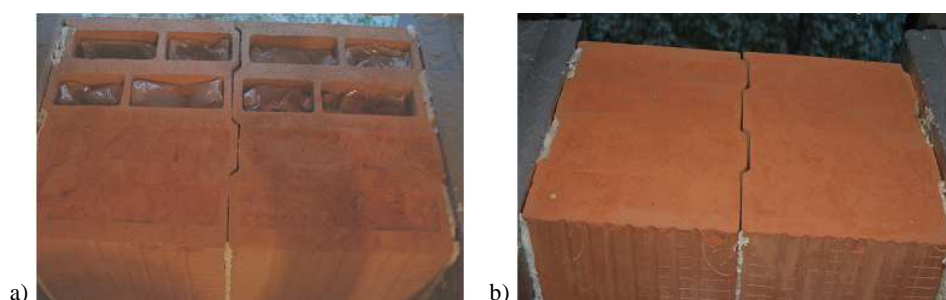
Rys. 2. Widok ścian od strony wewnętrznej

Fig. 2. A view the walls from the inner side

2.1. Rodzaj badanej przegrody

Zmodyfikowana przegroda kolektorowo-akumulacyjna składa się z dwóch warstw. Od strony zewnętrznej przegrody zastosowano przeszklenie o współczynniku przenikania ciepła $U_g = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ oraz współczynniku całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego $g = 50\%$. Warstwę murową stanowi zmodyfikowany pustak ceramiczny. W dwa pierwsze rzędy szczelin w elemencie, od strony zewnętrznej wprowadzono PCM. Szerokość szczelin wynosi 37 mm. Do badań wykorzystano parafinę o wysokiej pojemno-

ści ciepła, którą zamknięto w folii polietylenowej, tak aby podczas przemiany fazowej nie doszło do wycieku PCM w strukturę elementu ceramicznego. W celu zwiększenia akumulacyjności cieplnej elementu murowego, pozostałe dwie szczeliny wypełniono zagęszczoną mączką ceglana. Chcąc uzyskać wyłącznie wpływ PCM na przepływ strumienia ciepła w przegrodzie, przygotowano ścianę referencyjną bez materiału zmienno-fazowego. Wszystkie szczeliny pustaka ceramicznego zostały wypełnione zagęszczoną mączką ceglana (Rys.3).



Rys. 3. Widok zmodyfikowanych pustaków ceramicznych: a) z PCM, b) bez PCM

Fig. 3. A view the modified ceramic blocks: a) with PCM b) without PCM

Aby uzyskać jak największą absorpcję energii cieplnej z promieniowania słonecznego, powierzchnię zewnętrzną obydwu ścian pokryto warstwą farby w kolorze czarnym.

Podstawowe parametry materiałów wchodzących w skład elementu murowego przedstawiono w tabeli 1.

Wartość współczynnika przewodzenia ciepła oraz gęstość mączki ceglanej podano na podstawie danych uzyskanych w laboratorium Politechniki Rzeszowskiej. Równocześnie, lambda zastępcze dla pustaka z PCM wynosi $\lambda=0,225$ W/mK, natomiast dla pustaka bez materiału zmienno-fazowego wynosi $\lambda=0,220$ W/mK.

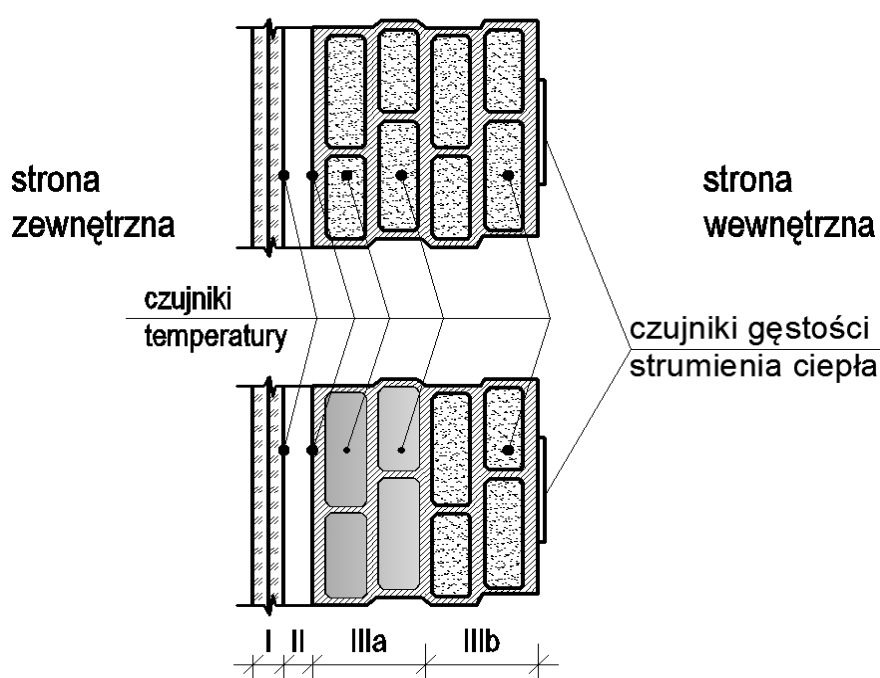
Tabela 1. Wybrane właściwości materiałów wchodzących w skład elementu murowego

Table 1. Selected properties of the materials included in the masonry element

Materiał	Gęstość [kg/m ³]	Temp. topnienia [°C]	Temp. krzepnięcia [°C]	Ciepło właściwe [kJ/kgK]	Ciepło utajone [kJ/kg]	Wsp. przew. ciepła [W/mK]
Czerep ceramiczny	885	-	-	1,0	-	0,266
Parafina - stała - ciekła	880 770	22-26	26-22	2,0	230	0,2
Mączka ceglana	1418	-	-	-	-	0,185

2.2. Aparatura

Do badań wykorzystano czujniki temperatury oraz płytowe mierniki przepływu ciepła. Czujniki zostały podłączone do systemu aktywizacji danych. Pomiar rejestrowano co 5 minut. Miejsca, w których usytuowano czujniki w przegrodzie przedstawiono na rysunku 4.

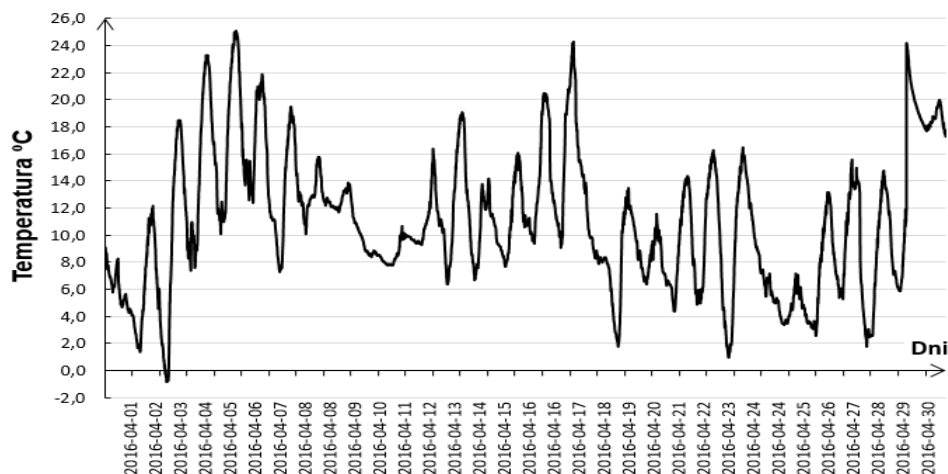


Rys. 4. Schemat przegrody badawczej bez i z materiałem zmienno-fazowym. I – przeszklenie, II – pustka powietrzna, IIIa – szczeliny wypełnione PCM w elemencie ceramicznym, IIIb – szczeliny wypełnione mączką ceglana w elemencie ceramicznym

Fig. 4. Scheme of the wall without and with phase change material. I – glazing, II – air gap, IIIa – gaps filled PCM in the ceramic element, IIIb – gaps filled ceramic powder in the ceramic element

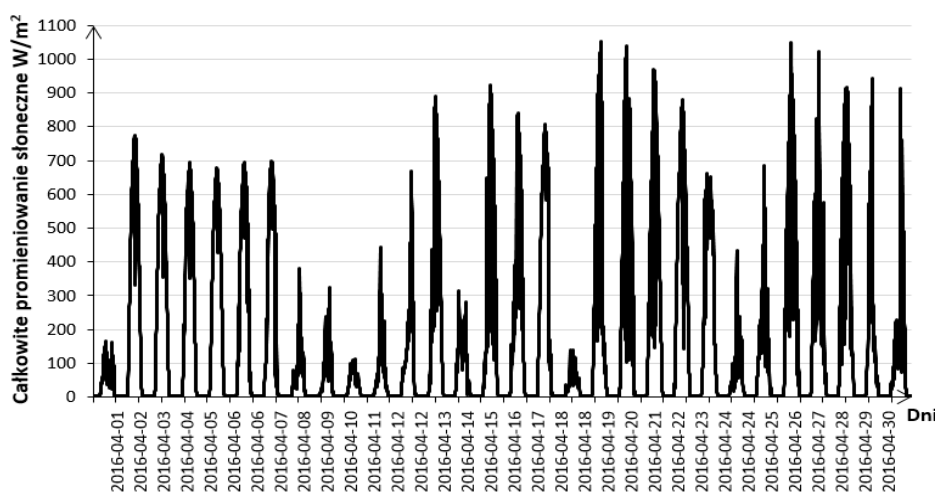
3. Wyniki i analiza badań

Miesiąc kwiecień 2016 roku charakteryzował się znacznymi wahaniami temperatur w ciągu dnia i nocy (Rys.5). Minimalna temperatura wyniosła $-0,8^{\circ}\text{C}$, maksymalna: $+25,1^{\circ}\text{C}$. W większość nocy temperatura spadała poniżej $+10^{\circ}\text{C}$. Równocześnie omawiany kwiecień cechował się przewagą dni słonecznych (Rys.6). Maksymalna wartość całkowitego promieniowania słonecznego wyniosła 1052 W/m^2 . Podczas operacji słonecznej, suma całkowitego promieniowania słonecznego wyniosła około $113,0 \text{ kWh/m}^2$.



Rys. 5. Temperatura powietrza zewnętrznego w miesiącu kwietniu 2016 roku

Fig. 5. External air temperature in the month of April 2016 years

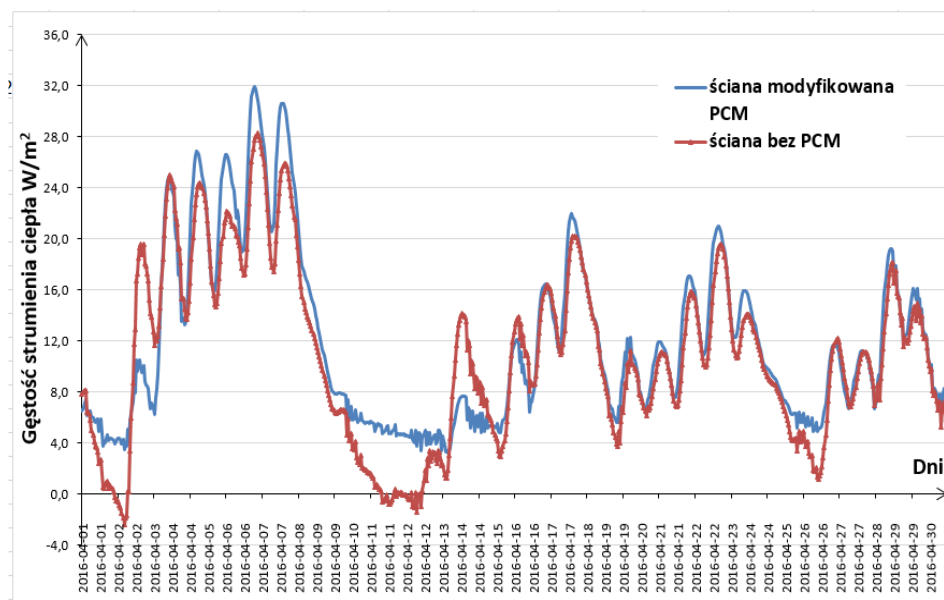


Rys. 6. Całkowite promieniowanie słoneczne w miesiącu kwietniu 2016 roku

Fig. 6. Total solar radiation in the month of April 2016 years

W analizie uwzględniono wartości strumienia ciepła od strony wewnętrznej powierzchni ściany (Rys.7). Średnia wartość miesięczna strumienia ciepła przenikającego do pomieszczenia, była nieznacznie wyższa dla przegrody zmodyfikowanej materiałem zmienno-fazowym i wynosiła $11,9 \text{ W/m}^2$. Dla przegrody bez PCM wartość ta wyniosła $10,7 \text{ W/m}^2$. Jednak przy wartościach minimalnych różnica w strumieniu ciepła między przegrodami wyniosła $5,5 \text{ W/m}^2$ - korzyst-

niej dla przegrody z PCM. W przegrodzie modyfikowanej przez cały okres kwietnia, przepływ strumienia był w kierunku pomieszczenia komory.



Rys. 7. Rozkład gęstości strumienia ciepła dla badanych przegród

Fig. 7. Heat flux density for the tested barriers

Po okresie kilku dni słonecznych następujących po sobie, maksymalna różnica wartości gęstości ciepła między przegrodami wyniosła ponad 4 W/m^2 , z korzyścią dla zmodyfikowanej przegrody. Przez kolejne cztery dni pochmurne występujące po długim czasie nasłonecznienia, w ścianie z materiałem zmienno-fazowym w dalszym ciągu strumień ciepła przenikał do pomieszczenia wewnętrznego i ustabilizował się na poziomie około 5 W/m^2 . W tym samym okresie w ścianie bez PCM pojawiły się niewielkie straty ciepła. W całym miesiącu trend pracy przegrody jest utrzymany, co świadczy o powtarzalności cyklu pracy zmodyfikowanej przegrody.

4. Wnioski

W przeprowadzonej analizie uwzględniono miesiąc kwiecień, czyli okres przejściowy, który na obszarze Polski najczęściej charakteryzuje się znacznymi wahaniami temperatur w ciągu dnia i nocy. Po przeanalizowaniu całego miesiąca, wartość strumienia ciepła jest korzystniejsza dla przegrody modyfikowanej materiałem zmienno-fazowym. W pierwszych dniach słonecznych przegroda bez PCM nagrzewa się szybciej, przekazując energię cieplną do komory. Jednak

przy dłuższym okresie działania promieniowania słonecznego, w ścianie modyfikowanej materiałem zmienno - fazowym wartość przepływu ciepła do pomieszczenia jest większa i wydłuża się w czasie. Ten korzystny nadmiar ciepła jest dostarczany podczas dni pochmurnych następujących po okresie słonecznym i wpływa na zmniejszenie wahań temperaturowych w przylegającym pomieszczeniu.

Dotychczasowe badania potwierdzają możliwość zastosowania materiałów zmienno-fazowych w elementach ściennych. Wkomponowanie ich zwiększa pojemność cieplną materiałów budowlanych, a tym samym następuje ograniczenie strat ciepła z pomieszczeń oraz poprawa komfortu ich użytkowania w budynku.

Literatura

- [1] Alawadhi E.M.: Thermal analysis of a building brick containing phase change material, *Energy and Buildings*, vol. 40, 2008, pp. 351-357.
- [2] Principi P., Fioretti R.: Thermal analysis of the application of pcm and low emissivity coating in hollow bricks, *Energy and Buildings*, vol. 51, 2012, pp. 131-142.
- [3] Silva T., Vicente R., Soares N., Ferreira V.: Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution, *Energy and Buildings*, vol. 49, 2012, pp. 235-245.
- [4] Wang X., Yu H., Li L., Zhao M.: Experimental assessment on the use of phase change materials (PCMs)-bricks in the exterior wall of a full-scale room, *Energy Conversion and Management*, vol. 120, 2016, pp. 81-89.
- [5] Heim D., Isothermal storage of solar energy in building construction, *Renewable Energy*, vol. 35, 2010, pp. 788-796.
- [6] Chwieduk D. A., Dynamics of external wall structures with a PCM (phase change materials) in high latitude countries, *Energy*, vol. 59, 2013, pp. 301-313.
- [7] Chwieduk D. A., Wybrane przykłady zastosowania materiałów PCM w budownictwie, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 29-38.
- [8] Lichołai L., Musiał M.: Wpływ organicznych materiałów zmienno-fazowych na efektywność energetyczną przegrody przezroczystej, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (4/16), październik-grudzień 2016, s. 329-337.

THE IMPACT OF A PHASE CHANGE MATERIAL ON THE ENERGY PERFORMANCE OF THERMAL STORAGE WALLS IN TRANSITIONAL CLIMATIC CONDITIONS

Summary

The article presents the analysis of selected parameters of thermal performance of thermal storage walls modified with a phase-change material (PCM). The tests were carried out in April, in an outdoor chamber, taking into account the actual climatic conditions: the value of solar

radiation and the outdoor air temperature. A reference wall without PCM has been set up in order to compare the test results. During the tests, the internal temperature of the chamber was kept at 20°C. The PCM in the tested chamber was integrated into the ceramic element of the wall and filled half of the element's area. The PCM was placed on the outer side of the element in order to have a suitable temperature sufficient for a phase change process to occur. The thermal storage wall has a glazing with a heat transfer coefficient of $U = 0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$. While analysing the impact of the PCM, the authors presented and compared the density of the heat flux on the internal side of the walls surface. The aim of the study was to determine the impact of solar radiation value on the modified thermal storage wall during a transitional period, when changing climatic conditions are quite common. Placing PCM on the outer side of the ceramic elements, as a component of the thermal storage walls, is one of the options applied in the carried out tests. Other PCM arrangement solutions will be the subject of further studies in order to select the most beneficial use of this material.

Key words: PCM, ceramics, thermal storage wall, solar radiation, heat flux

Przesłano do redakcji: 1.03.2017 r.

Przyjęto do druku: 31.03.2017 r.