

WSTĘPNA ANALIZA PARAMETRÓW TERMICZNYCH ZESTAWU SZYBOWEGO WYPEŁNIONEGO MATERIAŁEM FAZOWO ZMIENNYM

Anna WIEPRZKOWICZ*, Dariusz HEIM

*Politechnika Łódzka, Katedra Inżynierii Środowiska
ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, e-mail: wieprzkowicz.anna@gmail.com, dariusz.heim@p.lodz.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki analiz numerycznych dynamiki cieplnej wybranych rodzajów oszklenia modyfikowanych materiałem fazowo-zmiennym (MFZ). Analizy wykonano dla dwóch zestawów danych meteorologicznych, charakterystycznych dla klimatu umiarkowanego oraz podzwrotnikowego oraz trzech orientacji przegrody względem stron świata. W zależności od lokalizacji zdefiniowano 2 rozwiązania techniczne przegrody. Zaproponowano 3 kryteria determinujące żądane temperatury przemiany fazowej MFZ wypełniającego jedną z przestrzeni międzyszybowych. Na podstawie wyników analiz numerycznych wyznaczono wymagane temperatury oraz dobrano dostępne materiały z grupy parafin. Wybrane materiały stanowią niskotemperaturowe magazyny ciepła w zakresie temperatur przemiany 18-21°C w przypadku doboru dla okresu zimowego oraz 25-31°C (35°C dla Santiago) w przypadku analiz przeprowadzonych dla lata.

Słowa kluczowe: promieniowanie słoneczne, przemiana fazowa, temperatura przemiany, magazynowanie ciepła, dynamika cieplna

1. WPROWADZENIE

Transparentne elementy przegród zewnętrznych, pod względem parametrów fizycznych stanowią jeden z najsłabszych elementów obudowy budynku. Wartość współczynnika przenikania ciepła przeszkleń jest średnio cztery razy wyższa niż przegród nieprzezroczystych, co powoduje znaczny wzrost strat ciepła w okresie zimowym. Ponadto latem, ich stosunkowo wysoka przepuszczalność promieniowania słonecznego jest źródłem niepożądanych zysków ciepła, powodujących przegrzewanie pomieszczeń i całych budynków. Jednocześnie na przestrzeni całego roku, asymetria promieniowania w strefie przyokiennej powoduje pogorszenie warunków komfortu cieplnego. Elementy transparentne powodują zarówno większe straty ciepła w okresie zimowym jak również są źródłem niepożądanych zysków ciepła od promieniowania słonecznego

w okresie lata. Dodatkową niekorzystną cechą fizyczną tych elementów jest ich bardzo niska pojemność cieplna, dzięki czemu dynamiczne procesy zachodzące w samych oszkleniach przekładają się na dynamikę zmian parametrów środowiska wewnętrznego. Niemniej jednak, komponenty przezierne są nieodłącznym elementem przegród zewnętrznych, zapewniającym wymaganą ilość światła dziennego w pomieszczeniach oraz niezbędny dla użytkowników kontakt wzrokowy ze środowiskiem zewnętrznym.

Analiza przedstawiona w niniejszym artykule jest częścią projektu SOLTREN, którego celem jest opracowanie i przebadanie rozwiązania, które dzięki zastosowaniu materiału fazowo zmiennego (MFZ) pozwoli na poprawę efektywności energetycznej przegrody transparentnej z zachowaniem (przynajmniej okresowym) cech fizycznych przegrody translucentnej. Realizacja projektu została podzielona na 3 fazy: analizy teoretyczne i badania materiałowe, symulacje numeryczne oraz badania eksperymentalne. Rozważania przedstawione w artykule obejmują wstępne badania teoretyczne mające na celu wytypowanie materiałów oraz określenie ich konfiguracji, dających możliwość osiągnięcia najwyższej efektywności energetycznej wynikającej z zastosowania ich w tradycyjnym zestawie szybowym.

Modyfikacja właściwości optycznych oraz termicznych elementów oszklenia przy użyciu MFZ jest zagadnieniem stosunkowo nowym. Niemniej jednak, jak dotychczas przeprowadzono już pewne analizy symulacyjne oraz badania w skali laboratoryjnej dotyczące tego tematu. Pierwsze analizy teoretyczne oraz eksperymentalne, dotyczące wyznaczenia przepuszczalności promieniowania słonecznego przez układy dwuszybowe wypełnione powietrzem lub MFZ, zostały opublikowane już piętnaście lat temu [1]. Podobne badania, pokazujące możliwość ograniczenia zarówno strat jak i zysków ciepła przez

* Autor korespondencyjny, e-mail: wieprzkowicz.anna@gmail.com

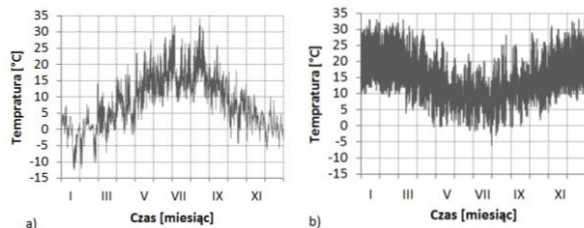
przegrody transparentne poprzez ich modyfikację materiałami fazowo zmiennymi, zostały przedstawione przez Weinladera [2]. W ciągu ostatnich lat, prowadzone były także rozważania teoretyczne mające na celu określenie efektu termicznego zastosowania MFZ o zróżnicowanych temperaturach przemiany w określonych warunkach klimatycznych [3] oraz ich eksperymentalna walidacja [4]. Jednak pomimo prób zdefiniowania modelu numerycznego układu wieloszybowego [5], większość prac eksperymentalnych prowadzona jest dla szyb jedno komorowych [6] lub komercyjnie dostępnego oszklenia z MFZ [7]. Istotnym zagadnieniem jest również analiza właściwości optycznych elementów transparentnych modyfikowanych MFZ [8]. Rozważania przedstawione w poniższym artykule rozpoczynają badania mające na celu opracowanie translucyentnego komponentu wielowarstwowego, którego parametry będą dobrane w sposób zapewniający maksymalną efektywność systemu w wybranych lokalizacjach. Analiza teoretyczna przeprowadzona została dla warunków klimatu umiarkowanego (Łódź, Polska) przy założeniu wschodniej i zachodniej orientacji fasady oraz klimatu podzwrotnikowego (Santiago, Chile) dla orientacji północnej. Lokalizacje te zostały wybrane ze względu na planowane w tych miejscach dalsze badań w skali rzeczywistej oraz walidację eksperymentalną modelu.

2. ANALIZA WARUNKÓW ZEWNĘTRZNYCH

2.1. Analiza warunków klimatycznych

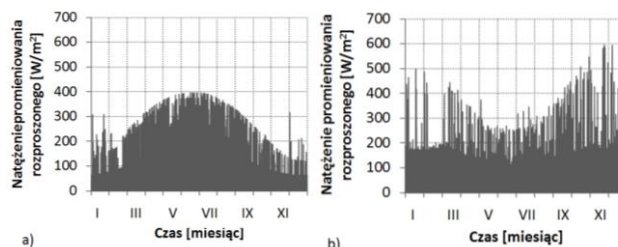
Ze względu na konieczność wyznaczenia parametrów projektowanego komponentu w zależności od występujących warunków cieplnych, analizie poddane zostały trzy podstawowe wielkości charakteryzujące klimat danej lokalizacji: temperaturę powietrza, natężenie promieniowania rozproszonego oraz bezpośredniego.

Zgodnie z danymi TMY temperatura zewnętrzna w Łodzi (rys. 1a) zmienia się w ciągu roku od $-12,5^{\circ}\text{C}$ to $34,3^{\circ}\text{C}$, osiągając wartość minimalną w styczniu, a maksymalną w sierpniu. W Santiago, najwyższa temperatura wynosi $33,2^{\circ}\text{C}$ i występuje w grudniu, natomiast najniższa $-6,0^{\circ}\text{C}$ w sierpniu (rys. 1b). Średnia roczna wartość temperatury w Łodzi wynosi $8,24^{\circ}\text{C}$, podczas gdy w Chile $14,43^{\circ}\text{C}$.



Rys. 1. Temperatura zewnętrzna w a) Łodzi, b) Santiago.
Fig. 1. External temperature in a) Lodz, b) Santiago.

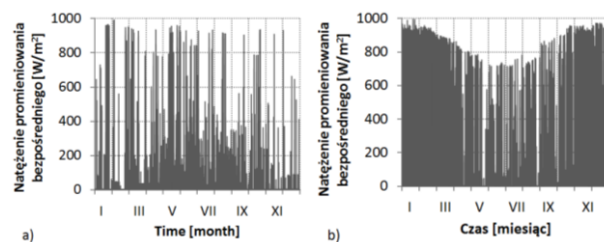
Analiza natężenia promieniowania rozproszonego (rys. 2) w Łodzi i Santiago wykazała, że dla obu lokalizacji jego roczna wartość sumaryczna jest porównywalna (650 kWh/m^2 w Łodzi oraz $649,48 \text{ kWh/m}^2$ w Santiago).



Rys. 2. Natężenie promieniowania rozproszonego w a) Łodzi, b) Santiago.

Fig. 2. Diffuse solar radiation in a) Lodz, b) Santiago.

Niemniej jednak, całkowita roczna ilość energii promieniowania bezpośredniego (rys. 3) w Santiago jest niemal trzykrotnie wyższa niż w Łodzi ($589,69 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$ w Łodzi oraz $1632,09 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$ w Santiago).



Rys. 3. Natężenie promieniowania bezpośredniego w a) Łodzi, b) Santiago.

Fig. 3. Direct solar radiation in a) Lodz, b) Santiago.

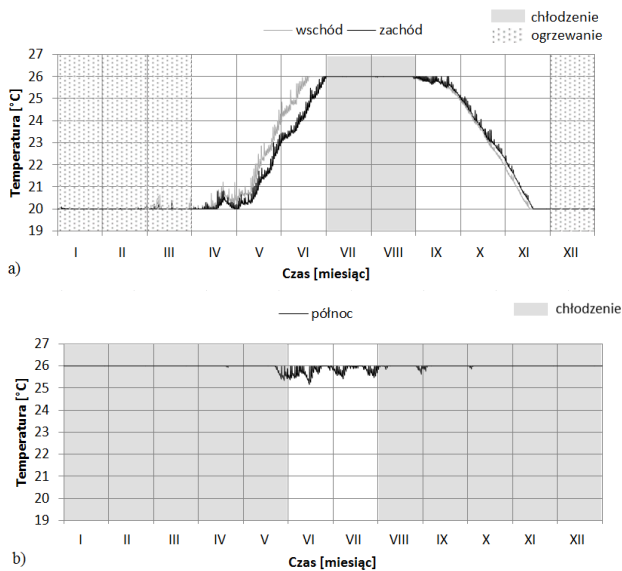
2.2. Wyznaczenie długości sezonu ogrzewczego i chłodniczego

Celem przedstawionych rozważań jest znalezienie i opracowanie rozwiązania technicznego, które pozwoli na zmniejszenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania oraz chłodzenia. Dlatego też, założono że analiza powinna być przeprowadzona dla okresów ekstremalnych, kiedy systemy HVAC wykazują największe zapotrzebowanie energetyczne. W celu wyznaczenia tych okresów, przeprowadzona została analiza symulacyjna, pozwalająca określić czas, kiedy praca systemów ogrzewania i chłodzenia jest niezbędna do utrzymania komfortowych warunków termicznych w pomieszczeniu.

Na podstawie wyników pokazanych na rys. 4 stwierdzono, że dla Łodzi, analizowane będą dwa sezony:

- ogrzewczy – 01.01 ÷ 31.03 oraz 01.12 ÷ 31.12,
- chłodniczy – 01.07 ÷ 31.08.

Dla lokalizacji Santiago przyjęto, że sezon chłodniczy trwa przez cały rok, z wyjątkiem czerwca i lipca.

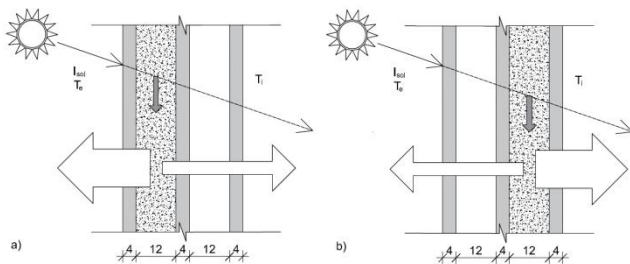


Rys. 4. Przebieg temperatury wewnętrznej w pomieszczeniu w warunkach klimatycznych a) Łodzi, b) Santiago.
Fig. 4. Room air temperature under climatic conditions of a) Lodz, b) Santiago.

3. USYTUOWANIE WARSTWY MFZ

3.1. Analiza dla lokalizacji Łodzi

W związku z obowiązującymi wymogami dotyczącymi izolacyjności termicznej okien, przyjęto że dla warunków klimatycznych Polski należy zastosować okna trzyszybowe. Daje to możliwość wypełnienia jednej z komór okna materiałem fazowo zmiennym, podczas gdy druga z komór będzie pełnił funkcję izolacji termicznej. Oznacza to, że istnieją dwa rozwiązania wykonania takiej przegrody, co pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Dwie możliwości usytuowania MFZ w oszkleniu w przypadku analizowanym dla Łodzi: a) MFZ zlokalizowany w zewnętrznej komorze, b) MFZ zlokalizowany w wewnętrznej komorze okna.

Fig. 5. Two possible arrangements of PCM glazing in Lodz: a) PCM located from outside, b) PCM located from inside.

Poza możliwością regulacji dostępu światła dziennego, głównym celem zastosowania MFZ w komponencie okiennym było:

- obniżenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania pomieszczeń, poprzez efektywne wykorzystanie energii promieniowania słonecznego – maksymalizacja zysków promieniowania w okresie ogrzewczym,
- obniżenie zapotrzebowania na energię do chłodzenia pomieszczeń, poprzez redukcję zysków promieniowania słonecznego w okresie lata.

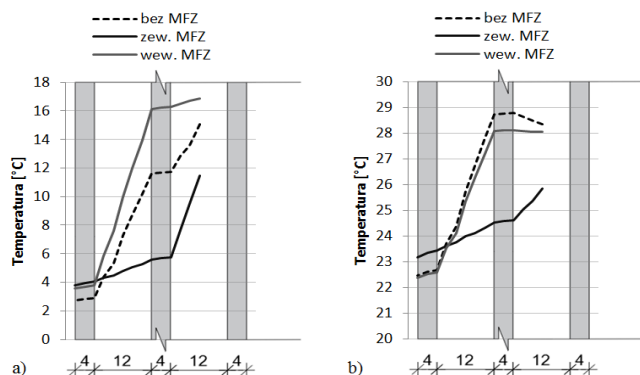
Ze względu na duże zróżnicowanie warunków klimatu zewnętrznego na przestrzeni roku założono, że poszukiwane będą dwa niezależne rozwiązania, dedykowane wyszczególnionym powyżej założeniom.

Na podstawie wstępnej analizy stwierdzono, że dla warunków letnich najefektywniejsze będzie umieszczenie MFZ w zewnętrznej komorze okna trzyszybowego (rys. 1a). W okresie znacznych zysków ciepła od promieniowania słonecznego, MFZ poprzez magazynowanie tych zysków pełniłby funkcję dynamicznej izolacji termicznej. Takie ułożenie warstw przegrody pozwoliłoby również na odsunięcie i odizolowanie warstwy MFZ od środowiska wewnętrznego, co ograniczyłoby oddawanie ciepła z MFZ do pomieszczenia. W okresie nocy, kiedy temperatura zewnętrzna spada poniżej temperatury zastalania możliwe będzie intensywne wypromieniowanie ciepła do otoczenia. Dodatkowo, w stanie stałym MFZ charakteryzuje się niższą przepuszczalnością promieniowania słonecznego, co dodatkowo przyczyni się do zmniejszenia zysków bezpośrednich od promieniowania słonecznego. Ze względu na dalszy plan badań eksperymentalnych, założono, że przypadek projektowany dla okresu chłodniczego będzie analizowany dla fasady zorientowanej na wschód, gdzie występują znaczne zyski ciepła w godzinach porannych.

Dla warunków zimowych założono, że MFZ należy umieścić w komorze wewnętrznej, tak, aby komora zewnętrzna, wypełniona gazem o niskiej przewodności cieplnej, pełniła funkcję izolacji termicznej. Założono, że taki komponent będzie charakteryzował się zarówno dobrą przepuszczalnością promieniowania słonecznego jak i dobrą izolacyjnością cieplną. W przypadku takiego ułożenia warstw przegrody, MFZ będzie pełnił niejako funkcję kolektora słonecznego. Absorbowana przez MFZ energia, przekształcana następnie w ciepło będzie akumulowana w okresie wysokiego promieniowania słonecznego, gdy temperatura materiału przekracza zarówno temperaturę zewnętrzną jak i wewnętrzną. Gdy materiał przechodzi do stanu płynnego, jego przepuszczalność promieniowania słonecznego gwałtownie wzrasta, co daje możliwość akumulacji dodatkowej ilości energii słonecznej bezpośrednio w masie termicznej pomieszczenia. Zaproponowana aranżacja warstw przegrody transparentnej pozwoli również na łatwe przenoszenie ciepła akumulowanego w warstwie MFZ do środowiska wewnętrznego w godzinach nocnych. Zjawiska te mogą być porównywane z procesami występującymi w czasie pracy niskotemperaturowych grzejników powierzchni-

wych. Niemniej jednak, źródłem energii dla zaproponowanego systemu jest energia promieniowania słonecznego. Ponadto, przenoszenie zakumulowanego ciepła do otoczenia zewnętrznego jest tłumione przez zewnętrzną przestrzeń międzyszybową wypełnioną gazem – efekt izolacji transparentnej. Ze względu na dalszy plan badań eksperymentalnych, założono, że przypadek projektowany dla okresu ogrzewczego będzie analizowany dla fasady zorientowanej na zachód, gdzie występują znaczne zyski ciepła w godzinach popołudniowych.

Dla potwierdzenia powyższych rozważań przeprowadzono analizę symulacyjną, na podstawie, której porównane zostały rozkłady średniej temperatury w przegrodzie niezmodyfikowanej oraz z MFZ umieszczonym od strony wewnętrznej i zewnętrznej, dla okresu ogrzewczego (rys. 6a) oraz chłodniczego (rys. 6b).



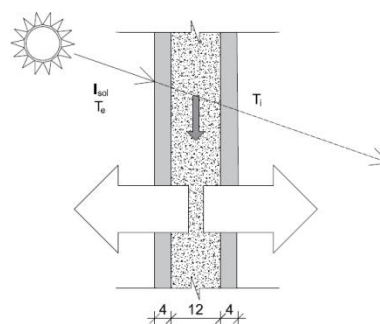
Rys. 6. Rozkład temperatury w przegrodzie transparentnej z MFZ zlokalizowanym od strony zewnętrznej oraz wewnętrznej w okresie: a) ogrzewczym, b) chłodniczym.

Fig. 6. Temperature distribution in PCM glazing filled with PCM from outside and inside in: a) heating season, b) cooling season.

Na podstawie wyników przedstawionych na rys. 2a można stwierdzić, że umieszczenie MFZ w wewnętrznej przestrzeni międzyszybowej pozwala na uzyskanie najwyższej temperatury w sezonie ogrzewczym, co potwierdza słuszność założeń. Co więcej, w okresie chłodniczym, kiedy celem zastosowania MFZ jest obniżenie temperatury, efekt ten jest zauważalnie największy w przypadku MFZ umieszczonego w komorze zewnętrznej, co również potwierdza wcześniejsze przypuszczenia.

3.2. Analiza dla lokalizacji Santiago

Ze względu na warunki klimatyczne oraz rodzaj przeszklenia stosowanego i dostępnego w Chile założono, że dla lokalizacji Santiago analizowane będzie okno dwuszybowe. W związku z powyższym, istnieje jedna możliwość modyfikacji właściwości cieplnych materiału wypełniającego przestrzeń międzyszybową za pomocą MFZ (rys. 7).



Rys. 7. Oszklenie z MFZ analizowane dla lokalizacji Santiago, Fig. 7. Arrangements of PCM glazing in Santiago.

4. ANALIZA TEMPERATURY PRZEMIANY

4.1. Parametry systemów HVAC – kryterium I

Z uwagi na założenie, że w sezonie ogrzewczym temperatura wewnętrzna powinna wynosić nie mniej niż 20 °C, a w sezonie chłodniczym nie powinna przekraczać 26 °C, stwierdzono, że optymalna temperatura przemiany MFZ powinna być o jeden stopień powyżej (zimą) lub poniżej (latem) wartości temperatury powietrza wewnętrznego utrzymywanej przez system HVAC. Zakładając idealne sterowanie systemami HVAC, pozwoli to zapobiec „ładowaniu” MFZ energią cieplną pochodzącą z systemu ogrzewania/chłodzenia. Założono zatem, że:

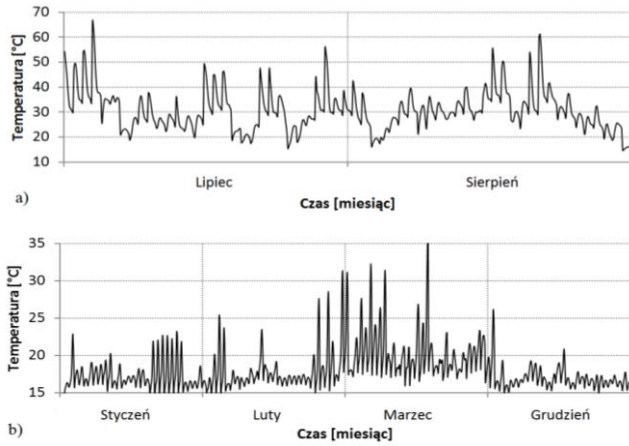
- w okresie ogrzewczym temperatura topnienia powinna wynosić 21 °C, co pozwoli na efektywną akumulację energii promieniowania słonecznego i podniesienie temperatury powierzchni wewnętrznej analizowanej przegrody,
- w okresie chłodniczym temperatura zestalania powinna wynosić 25 °C, co pozwoli utrzymać temperaturę w pomieszczeniu w zakresie komfortu termicznego, podczas gdy system nie będzie jeszcze aktywny.

4.2. Wartość średnia temperatury występującej w warstwie MFZ – kryterium II

Akumulacja energii cieplnej w MFZ następuje na skutek zmiany temperatury. Niemniej jednak, założono, że w badanym komponencie kluczową rolę odgrywać będzie magazynowanie energii cieplnej promieniowania słonecznego. Dlatego też, analizę temperatur występujących na głębokości usytuowania warstwy MFZ przeprowadzono jedynie dla okresu występowania zysków od promieniowania słonecznego, w godzinach 8:00 – 16:00. Przyjęto, że temperatura przemiany MFZ powinna odpowiadać średniej temperaturze występującej w materiale, tak, aby bodziec wywołujący przemianę fazową występował możliwie często, maksymalizując efekt akumulacji ciepła.

Na podstawie przebiegów przedstawionych na rys. 8, wyznaczono wartości średnie temperatur, które wyniosły:

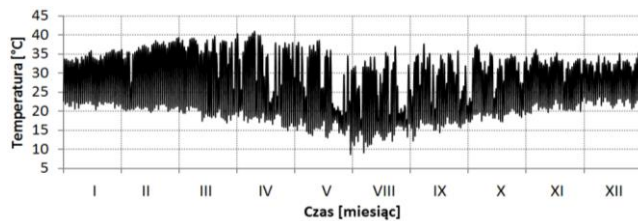
- 30,51°C dla sezonu chłodniczego
- 17,99°C dla sezonu ogrzewczego



Rys. 8. Temperatura w przegrodzie transparentnej w przestrzeni międzyszybowej wypełnionej MFZ, wyznaczona dla lokalizacji Łodzi, w okresie: a) chłodniczym, b) ogrzewczym.

Fig. 8. Temperature distribution in glazing cavity filled with PCM, in location of Lodz, during: a) cooling season, b) heating season.

Dla warunków klimatycznych Santiago, temperatura średnia dla analizowanego okresu, w środkowym punkcie komponentu wyniosła 27,83 °C (rys. 9). Na wartość średnią otrzymanej temperatury znaczący wpływ miała jednokomorowa konstrukcja przegrody i wpływ stabilnej temperatury powietrza wewnętrznego, utrzymywanej na poziomie ≤ 26 °C.



Rys. 9. Temperatura w przegrodzie transparentnej w przestrzeni międzyszybowej wypełnionej MFZ, wyznaczona dla lokalizacji Santiago w okresie chłodniczym.

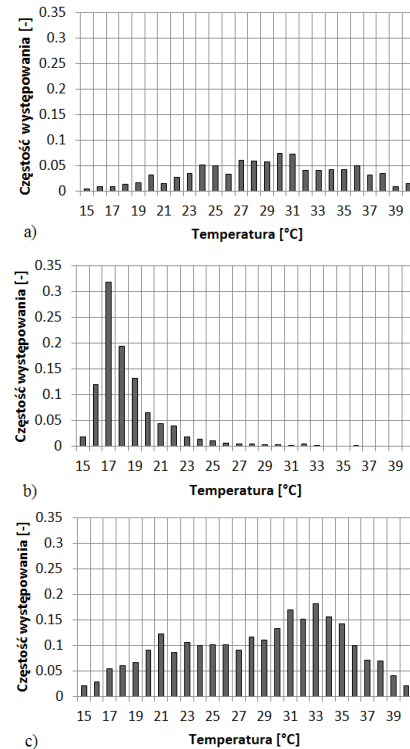
Fig. 9. Temperature distribution in glazing cavity filled with PCM, in location of Santiago during cooling season.

4.3. Najczęściej występująca wartość temperatury w lokalizacji MFZ – kryterium III

Analogicznie, jak w pkt 4.2. przyjęto, że temperatura przemiany MFZ powinna odpowiadać temperaturze najczęściej występującej w komorze wypełnionej MFZ, tak aby bodziec wywołujący przemianę fazową występował możliwie często, maksymalizując efekt akumulacji ciepła.

Na podstawie histogramów przedstawionych na rys. 10, stwierdzono, że temperaturami występującymi najczęściej są:

- 30°C dla sezonu chłodniczego w Łodzi
- 17°C dla sezonu ogrzewczego w Łodzi
- 33°C dla sezonu chłodniczego w Santiago



Rys. 10. Histogram temperatury w przegrodzie transparentnej w przestrzeni międzyszybowej wypełnionej MFZ, wyznaczonej dla lokalizacji Łodzi, w okresie: a) chłodniczym, b) ogrzewczym oraz c) w Santiago

Fig. 10. Histogram of temperature in glazing cavity filled with PCM, in location of Lodz, during: a) cooling season, b) heating season and c) in Santiago

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki wstępnej analizy teoretycznej mającej na celu określenie podstawowych rozwiązań technicznych translucentnego komponentu budowlanego oraz parametrów cieplnych MFZ wypełniającego jedną z przestrzeni międzyszybowych. Założenia komponentu przeznaczony jest do magazynowania energii cieplnej promieniowania słonecznego. Analizie poddane zostały rozwiązania konstrukcyjne, dedykowane wybranym lokalizacjom i charakterystycznym dla nich warunkom klimatycznym. Głównym celem przedstawionych badań było wybranie materiałów fazowo

zmiennych, mogących w sposób efektywny ograniczyć zyski oraz straty ciepła przez przegrodę transparentną. Wyboru materiałów rekomendowanych do dalszych badań dokonano na podstawie analizy temperatury przemiany materiału. Materiały te zostały wytypowane za pomocą trzech przyjętych kryteriów:

- I – dostosowanie temperatury przemiany do parametrów systemu HVAC;
- II – dostosowanie temperatury przemiany do temperatury średniej występującej w warstwie MFZ;
- III – dostosowanie temperatury przemiany do temperatury najczęściej występującej w warstwie MFZ.

Ze względu na właściwości fizyczne, do dalszych badań wybrano parafiny firmy Rubitherm [9], charakteryzujące się dużymi pojemnościami cieplnymi oraz dużym zakresem temperatur przemiany. Zestawienie otrzymanych wyników oraz materiałów rekomendowanych do dalszych badań przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Materiały rekomendowane do dalszych badań.
Table 1. Materials recommended for further research.

Lokalizacja	Sezon	Kryterium	Rekomendowana temperatura [°C]	Rekomendowany materiał
Łódź	Chłodniczy	I	25,00	RT25HC
		II	30,51	RT31
		III	30,00	RT28HC/RT31
	Ogrzewczy	I	21,00	RT21HC
		II	17,99	RT18HC
		III	17,00	RT18HC
Santiago	Chłodniczy	I	25,00	RT25HC
		II	27,83	RT28HC
		III	33,00	RT31/RT35

Badania przedstawione w artykule są częścią projektu badawczego, w ramach którego planuje się również:

- określenie zmiennych charakterystyk optycznych i termicznych komponentów w możliwych stanach skupienia (stały, płynny, przejściowy) z wykorzystaniem technik spektrofotometrycznych,
- parametryczną analizę elementów oszklenia z MFZ pod względem efektywności energetycznej i komfortu cieplnego z wykorzystaniem autorskich modeli numerycznych,
- eksperymentalne określenie charakterystyki cieplnej oszklenia modyfikowanego MFZ,
- określenie możliwości zastosowania proponowanego komponentu (aplikacja proponowanego rozwiązania konstrukcyjnego) w różnych warunkach klimatycznych i pogodowych.

PRELIMINARY ANALYSIS OF THE THERMAL PROPERTIES OF GLAZING UNIT FILLED WITH PHASE CHANGE MATERIAL

Summary: The paper presents results of numerical analysis of thermal dynamics of selected types of glazing modified with phase-change material (PCM). The analyzes were performed for two sets of meteorological data, typical for the moderate and subtropical climate, and the three orientations of façade. Depending on the location, two technical solutions were defined. Three criteria have been proposed to determine the most efficient phase transition temperature of PCM filling one of the window cavities. Based on the results of numerical analysis, the required temperatures were determined and materials from the paraffin group were selected. Selected materials are low temperature heat stores with a transition temperature of 18-21°C for winter season and 25-31°C (35°C for Santiago) for summer analyzes.

Literatura

- [1] Ismail K.A.R., Henriquez J.R. *Parametric study on composite and PCM glass systems*. Energy Conversion and Management 43 (2002) 973-993
- [2] Weinlader H., Beck A., Fricke J. *PCM-facade-panel for daylighting and room heating*. Solar Energy 78 (2005) 177-186
- [3] Zhong K., Li S., Sun G., Li S., Zhang X. *Simulation study on dynamic heat transfer performance of PCM-filled glass window with different thermophysical parameters of phase change material*. Energy and Buildings 106 (2015) 87-95
- [4] Li S., Zhong K., Zhou Y., Zhang X. *Comparative study on the dynamic heat transfer characteristics of PCM-filled glass window and hollow glass window*. Energy and Buildings 85 (2014) 483-492
- [5] Goia F., Perino M., Haase M. *A numerical model to evaluate the thermal behaviour of PCM glazing system configurations*. Energy and Buildings 54 (2012) 141-153
- [6] Goia F., Perino M., Serra V. *Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype*. Solar Energy 100 (2014) 217-233
- [7] Grynning S., Goia F., Time B. *Dynamic thermal performance of a PCM window system: characterization using large scale measurements*. Energy Procedia 78 (2015) 85-90
- [8] Heim D. *Modyfikacja termo-optycznych właściwości transparentnych elementów obudowy budynków*. PAN, Warszawa 2011.
- [9] <https://www.rubitherm.eu/>

Praca naukowa finansowana ze środków przyznanych w ramach konkursu ERANet-LAC 2nd Joint Call on Research and Innovation jako projekt badawczy nr EraNet-LAC/SOLTREN/03/2017 „Solar hybrid translucent component for thermal energy storage in buildings”.