Oryginalny artykuł naukowy (Original research paper)

prof. dr hab. inż. Barbara Klemczak[1)*)]
ORCID: 0000-0002-8102-894X
prof. dr inż. Edwardus A. B. Koenders[2)]
ORCID: 0000-0001-8664-2554
prof. dr inż. Henk Jonkers[3)]
ORCID: 0000-0003-1156-7195
prof. dr inż. Victor Fachinotti[4)]
ORCID: 0000-0002-5702-6274
dr inż. Christoph Mankel[2)] ORCID: 0000-0001-8376-6156
dr inż. Frank Röser[5)] ORCID: 0000-0002-5926-1593
dr Jorge S. Dolado[6)] ORCID: 0000-0003-3686-1438
dr Edurne Erkizia[7)] ORCID: 0000-0003-4343-7141
dr Jean-Luc Dauvergne[8)] ORCID: 0000-0002-5356-5596
dr Amaya Ortega[9)] ORCID: 0000-0002-2285-5988
dr Francesca Zanoni[10)]
dr inż. Jan Červenka[11)] ORCID: 0000-0003-4945-1163
mgr inż. Michael Düngfelder[12)], *mgr Christina Stunz*[12)]
mgr Dmitry Zhilyaev[3)] ORCID: 0000-0003-1277-8891
mgr inż. arch. Vesselin A. Kolev[13)]

Ultralekki pianobeton z dodatkiem materiału zmiennofazowego do stosowania jako termoizolacja

Ultralight foamed concrete with the addition of phase change material for thermal insulation applications

DOI: 10.15199/33.2024.02.09

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane wyniki projektu NRG-STORAGE, którego celem jest opracowanie ultralekkiego pianobetonu z dodatkiem materiału zmiennofazowego (PCM), który ma zdolność do magazynowania i uwalniania ciepła. Uzyskane wyniki pokazały, że badany pianobeton o gęstości objętościowej 240 kg/m^3 z dodatkiem 10% PCM charakteryzuje się wystarczającą wytrzymałością mechaniczną jako materiał termoizolacyjny, dobrymi właściwościami termofizycznymi oraz zdolnością do akumulacji i oddawania ciepła.
Słowa kluczowe: pianobeton; materiał zmiennofazowy (PCM); wytrzymałość na ściskanie; właściwości cieplne; skurcz.

Abstract. The article presents selected results of the NRG-STORAGE project, aiming to develop ultralight foamed concrete with the addition of phase change material (PCM), which has the ability to store and release heat. The obtained results showed that the tested foamed concrete with a bulk density of 240 kg/m^3 and with the addition of 10% PCM is characterised by sufficient mechanical strength for thermal insulation applications, good thermophysical properties, and the ability to accumulate and release heat.
Keywords: foamed concrete; phase change material (PCM); compressive strength; thermal properties; shrinkage.

Europejskie przepisy dotyczące ochrony klimatu nakładają obowiązek osiągnięcia do 2030 r. celu Unii Europejskiej, polegającego na zmniejszeniu emisji dwutlenku węgla o co najmniej 55% [1]. W związku z tym podejmowane są liczne działania, również w sektorze budownictwa, w celu realizacji tego zadania oraz zapewnienia neutralności klimatycznej do 2050 r. Szczególny nacisk kładzie się na zmniejszenie zużycia energii na ogrzewanie i chłodzenie budynków, ponieważ jest to obszar, który pochłania znaczną ilość energii [2, 3]. Z danych [4] wynika, że ogrzewanie i chłodzenie budynków pochłania blisko połowę całkowitego zużycia energii w UE. Jest to więc sektor o dużym potencjale oszczędności energii, dlatego też obecnie istnieje duże zapotrzebowanie na nowe rozwiązania materiałów termoizolacyjnych, które ograniczą zużycie energii do ogrzewania i chłodzenia w budynkach. Jednym z rozważanych rozwiązań jest zastosowanie ultralekkiego pianobetonu o gęstości mniejszej niż 250 – 300 kg/m^3, jako alternatywy dla tradycyjnych materiałów termoizolacyjnych, takich jak wełna mineralna czy styropian. Pianobeton, który jest znany od wielu lat [5, 6], charakteryzuje się mikrostrukturą komórkową, co sprawia, że ma małą gęstość objętościową, a jednocześnie zapewnia dobre właściwości odporności ogniowej i izolacyjności termicznej [7, 8]. W przypadku stosowania pianobetonu jako materiału termoizolacyjnego powinien on charakteryzować się małym współczynnikiem przewodzenia ciepła oraz odpowiednią wytrzymałością umożliwiającą jego transport, montaż oraz zastosowanie w warstwie izolacyjnej. Ogólnie rzecz biorąc, wytrzymałość na ściskanie i przewodnictwo cieplne pianobetonu zależą od jego gęstości (obie wielkości zmniejszają się wraz ze spadkiem gęstości), ale ważną rolę odgrywa także struktura pęcherzyków powietrza w mieszance pianobetonowej

[1)] Politechnika Śląska (SUT), Wydział Budownictwa, Poland; [2)] Technical University of Darmstadt (TUDa), Institute of Construction and Building Materials, Germany; [3)] Delft University of Technology (TUD), Netherlands
[4)] Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC), Argentina
[5)] Wilhelm Roser Sohne GMBH CO. KG (RIB), Germany; [6)] Materials Physics Centre (MPC), Spain
[7)] TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Spain; [8)] Centre for Cooperative Research on Alternative Energies (CIC energiGUNE), Spain
[9)] GRAPHENEA SA, Spain; [10)] SPHERA ENCAPSULATION SRL, Italy; [11)] Červenka Consulting, Czech Republic
[12)] NETZSCH Geratebau GMBH, Germany; [13)] Glavbolgarstroy Holding AD (GBS), Bulgaria
[*)] Adres do korespondencji: barbara.klemczak@polsl.pl

[9, 10]. Dodatkowym atutem pianobetonu, w porównaniu z innymi materiałami termoizolacyjnymi, jest jego dosyć łatwy recykling [11], co wpisuje się w koncepcję gospodarki o obiegu zamkniętym i wykorzystywania materiałów budowlanych jako surowców wtórnych.

Właściwości termiczne ultralekkiego pianobetonu mogą zostać poprawione przez wprowadzenie materiału zmiennofazowego (ang. *Phase Change Material*, PCM), który w temperaturze przemiany fazowej może ulegać odwracalnym i powtarzalnym zmianom ze stanu stałego do ciekłego. W trakcie tej przemiany materiały zmiennofazowe mogą absorbować, akumulować i uwalniać dużą ilość energii na jednostkę masy [12]. Dzięki dodaniu PCM do ultralekkiego pianobetonu powstaje więc nowy, lekki materiał, który łączy w sobie właściwości izolacyjne ze zdolnością do magazynowania i uwalniania ciepła. Taki materiał izolacyjny może więc zmniejszyć zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia oraz poprawić efektywność energetyczną budynków [12, 13].

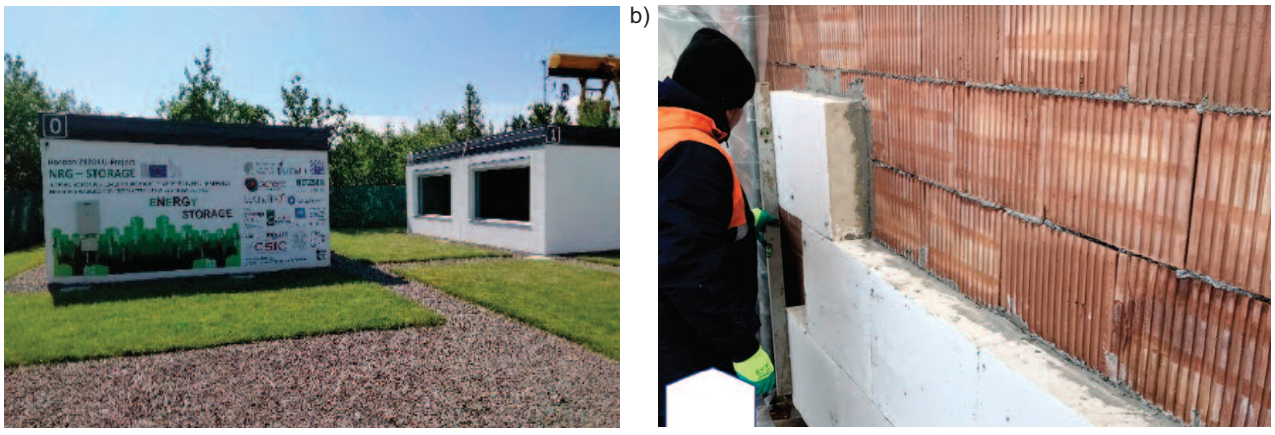
W artykule przedstawiono badania prowadzone w ramach projektu EU Horyzont 2020 pt. *Integrated Porous Cementitious Nanocomposites In **N**on-**R**esidential Building Envelopes For **G**reen Active/Passive Energy **Storage (NRG-STORAGE)***, którego głównym celem jest opracowanie ultralekkiego pianobetonu z dodatkiem materiału zmiennofazowego [14]. Prowadzone badania ultralekkiego pianobetonu o gęstości 200 – 240 kg/m^3 są zorientowane na pasywną (pod wpływem temperatury otoczenia) oraz wymuszoną (związaną z dodatkiem grafenu i wykorzystaniem przewodnictwa elektrycznego materiału do podgrzania go do temperatury przemiany fazowej) aktywację PCM w pianobetonie. Prace badawcze rozpoczęły się od badań podstawowych komponentów pianobetonu oraz zaczynu cementowego [15, 16] i były wykonywane w Hiszpanii (CSIC, TECNALIA, CIC energiGUNE, GRAPHENEA), Włoszech (SPHERA ENCAPSULATION) oraz Niemczech (TUDa). W Niemczech (TUDa, RIB) został również opracowany i przetestowany skład ultralekkiego pianobetonu z materiałem zmiennofazowym. Badania skurczu, który okazał się dużym problemem w produkcji pianobetonu, jak również metod ograniczenia ryzyka rys skurczowych i właściwości mechanicznych przeprowadzono na Politechnice Śląskiej w Gliwicach [17]. Właściwości termiczne pianobetonu oraz rozkład temperatury w ścianach z wykonaną z niego termoizolacją, badany w specjalnych komorach klimatycznych (hot box), zostały określone przez NETZSCH (Niemcy). W projekcie przewidziano również badania efektywności energetycznej demonstracyjnych budynków ocieplonych ultralekkim pianobetonem z dodatkiem PCM. Budynki te zostały wybudowane na potrzeby projektu przez GBS w Bułgarii (fotografia 1), a wszystkie panele z ultralekkiego pianobetonu (fotografia 2) zostały wyprodukowane w Niemczech (RIB). Dodatkowo, w komorze starzeniowej znajdującej się na Politechnice Śląskiej prowadzone są badania trwałości materiału, przede wszystkim odporności kapsułek PCM na szybkie zmiany temperatury podczas grzania/chłodzenia. Badania te zostaną wykorzystane w szczegółowej analizie cyklu życia (*Life Cycle Analysis* – LCA) proponowanego nowego materiału. Takie analizy [13], których wynik jest niezwykle istotny w kontekście opracowania nowego materiału do zrównoważonego budownictwa, są prowadzone przez Uniwersytet Techniczny w Delft (Holandia). Dodatkowo, w ramach projektu prowadzone są w Argentynie (CIMEC) oraz w Czechach (Červenka Consulting) obszerne symulacje komputerowe zachowania się nowego materiału oraz przewidywanej poprawy jego efektywności energetycznej [12, 18].

W artykule przedstawiono wyniki badań ultralekkiego pianobetonu o gęstości objętościowej 240 kg/m^3, z dodatkiem 10% PCM oraz bez dodatku PCM. Celem badań było określenie podstawowych właściwości pianobetonu, istotnych w jego praktycznym zastosowaniu, takich jak wytrzymałość na ściskanie, współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe, skurcz oraz odpowiedź termiczna pianobetonu poddanego zmianom temperatury zewnętrznej od +50 do -10°C. W badaniach porównano efekty zastosowania dodatku PCM w pianobetonie. Należy dodać, że obecnie nie jest znane zastosowanie dodatku PCM do pianobetonu o tak małej gęstości.

Materiały i metody badań

W ramach projektu opracowano kilka receptur pianobetonu o gęstości 200 – 240 kg/m^3, bez dodatku PCM oraz z dodatkiem PCM w ilości 10% lub 20% objętości zaczynu. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicz-

a) b)



Fot. 1. Budynki demonstracyjne w Bułgarii (a); montaż paneli z ultralekkiego pianobetonu z PCM (b)
Photo 1. Demonstration buildings in Bulgaria (a); installation of ultralight foamed concrete panels with PCM (b)

Fot. 2. Produkcja paneli z pianobetonu w RIB (a); panele dostarczone do montażu w Bułgarii (b)
Photo 2. Production of foamed concrete panels in RIB (a); panels delivered for installation in Bulgaria (b)

nych, termicznych i odkształceń skurczowych jednego z opracowanych ultralekkich pianobetonów o gęstości 240 kg/m^3 z dodatkiem 10% PCM oraz pianobetonu referencyjnego bez dodatku PCM. Ultralekki pianobeton wykonywano dwuetapowo – najpierw przygotowano zaczyn, który następnie mieszano z pianą wytworzoną w generatorze piany [9, 10]. Skład zaczynu cementowego z 10% PCM oraz zaczynu referencyjnego bez PCM przedstawiono w tabeli. Podstawowymi składnikami zaczynu były cement portlandzki CEM I 52,5 R oraz metakaolin. Stosunek wagowy wody do spoiwa w zaczynie wynosił 0,4. W zaczynie zastosowano 3 domieszki, które miały na celu uzyskanie odpowiedniej jednorodności i stabilności mieszanki pianobetonowej (stabilizator), przyspieszenie procesu tworzenia porowatej struktury i poprawę stabilności pustek powietrznych (domieszka przyspieszająca) oraz uzyskanie odpowiedniej konsystencji zaczynu (superplastyfikator PCE). W badaniu wykorzystano PCM na bazie parafiny w osłonce z polimeru melaminowo-formaldehydowego. Temperatura topnienia/krzepnięcia zastosowanego PCM wynosi 24°C, a średnie uziarnienie to 15 – 30 µm [19]. Pianę o gęstości 70 kg/m^3 wytwarzano, stosując płynny proteinowy środek pianotwórczy w ilości 2% w stosunku do objętości wody użytej do sporządzenia piany, co daje proporcję płynnego środka pianotwórczego do cementu w pianobetonie na poziomie 1 kg/100 kg. Założoną gęstość 240 kg/m^3 uzyskiwano, dodając do zaczynu odpowiednią ilość piany (86 – 87% objętości mieszanki pianobetonu). Całkowity stosunek wagowy wody do spoiwa w pianobetonie wynosił 0,77 (pianobeton bez PCM) i 0,78 (pianobeton z 10% PCM).

Skład zaczynu
Paste composition

Składnik	Zawartość składników [kg/m^3]	
	bez PCM	10% PCM
Cement CEM I 52,5 R	142,8	136,2
Metakaolin	22,3	21,2
PCM	0,0	11,1
Superplastyfikator	0,8	0,8
Stabilizator	4,7	4,6
Domieszka przyspieszająca	3,3	3,2
Woda	66,0	63,0

Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonano na próbkach sześciennych 100 x 100 x 100 mm, które obciążano z prędkością 0,5 MPa/s. Próbki były przechowywane w formach przez pierwsze 24 h, a następnie, po rozformowaniu, w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 60%. **Pomiar współczynnika przewodzenia ciepła** wykonano aparatem [20], który wykorzystuje metodę niestacjonarną pomiaru, polegającą na analizie odpowiedzi temperatury badanego materiału na impulsy przepływu ciepła. W przeprowadzonych badaniach zastosowano sondę powierzchniową o zakresie pomiarowym 0,04 – 0,30 Wm^{-1}K^{-1}. **Pomiar ciepła właściwego** wykonano w aparacie płytowym [21], w którym badana próbka umieszczana jest pomiędzy dwiema podgrzewanymi płytami, a przepływ ciepła jest mierzony za pomocą czujników strumienia ciepła pokrywających duży obszar po obu stronach próbki. **Badania wytrzymałości na ściskanie oraz właściwości termicznych** określano każdorazowo na trzech próbkach, po 28 dniach dojrzewania pianobetonu. Wilgotność masowa próbek wynosiła średnio 4 – 5%.

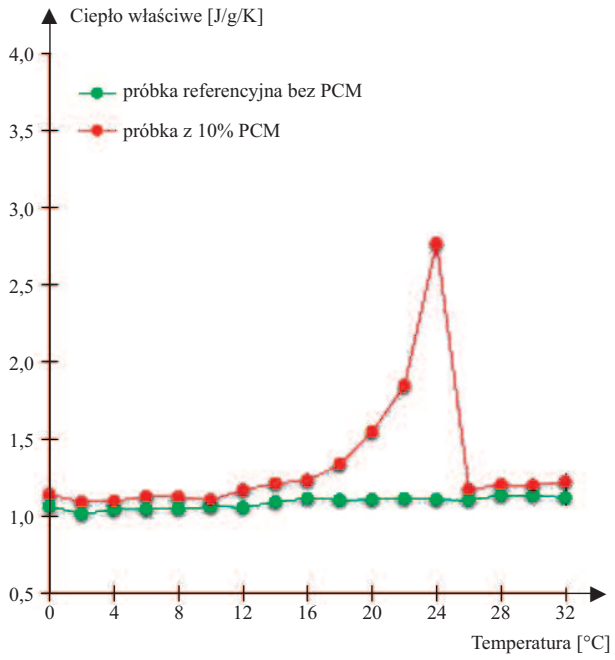
Otrzymane wyniki charakteryzowały się małym odchyleniem standardowym – średnio 7,5% wartości średniej wytrzymałości na ściskanie pianobetonów z dodatkiem PCM i bez PCM. Podobnie było w przypadku mierzonych właściwości termicznych, gdzie odchylenie standardowe nie przekroczyło 5,5% otrzymanych wartości średnich. **Badanie skurczu wysychania** przeprowadzono w rynnach stalowych, które umożliwiają ciągły pomiar odkształceń (czujniki LVDT) w całym okresie dojrzewania pianobetonu zgodnie z metodą przedstawioną w [22]. Pomiar skurczu prowadzono w komorze klimatycznej w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 60%. Odpowiedź termiczna próbek z pianobetonu, poddanych szyb-

kim zmianom temperatury zewnętrznej od +50 do -10°C, była rejestrowana za pomocą czujników temperaturowych podczas badań trwałościowych w komorze starzeniowej.

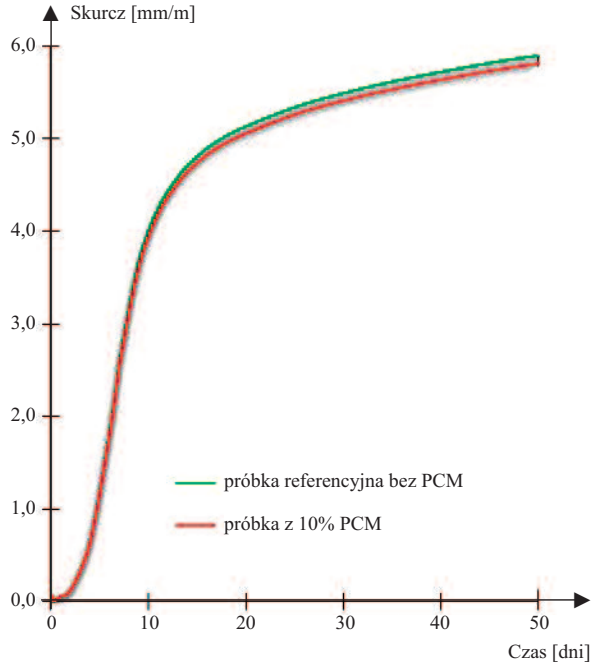
Wyniki badań i dyskusja

Zgodnie z oczekiwaniami, próbki z 10% PCM osiągnęły mniejszą wytrzymałość na ściskanie niż próbki referencyjne (bez PCM), ponieważ w badanym kompozycie PCM zastępuje część spoiwa w zaczynie. Średnia wytrzymałość wyniosła 0,37 MPa (próbki z 10% PCM) oraz 0,41 MPa (próbki referencyjne). Zastąpienie 10% objętości bazowego zaczynu materiałem zmiennofazowym (PCM) spowodowało zmniejszenie wytrzymałości o ok. 10%. Pomimo dosyć małej wytrzymałości, wyprodukowane panele pianobetonowe, transportowane w typowy sposób na palecie (fotografia 2b) z Niemiec do Bułgarii (ok. 1700 km), nie wykazały żadnych uszkodzeń. Podczas montażu (fotografia 1b), jak również podczas obecnie trwających (8 miesięcy) badań w budynkach demonstracyjnych nie odnotowano żadnych uszkodzeń paneli pianobetonowych. Współczynnik przewodzenia ciepła pianobetonów, wyznaczony aparatem Isomet, był zbliżony, przy czym nieco mniejszą wartość otrzymano w przypadku próbek z materiałem zmiennofazowym. Współczynnik przewodzenia ciepła próbek referencyjnych wyniósł 0,082 $Wm^{-1}K^{-1}$, a w przypadku próbek z 10% PCM 0,077 $Wm^{-1}K^{-1}$. Należy zauważyć, że są to wartości większe niż uzyskiwane w przypadku typowych materiałów termoizolacyjnych, które jednak nie mają zdolności do akumulacji/oddawania ciepła. **Wyniki pomiaru ciepła właściwego**, wyznaczone w aparacie płytowym, pokazano na rysunku 1. Średnia wartość ciepła właściwego zmierzona w próbce referencyjnej wyniosła 1,084 $Jg^{-1}K^{-1}$. Była więc zbliżona do wartości uzyskiwanych w typowych kompozytach cementowych. W przypadku próbki zawierającej 10% PCM widoczny jest efekt przemiany fazowej w temperaturze 24°C i wzrost ciepła właściwego w trakcie tej przemiany aż do 2,8 $Jg^{-1}K^{-1}$, co potwierdza zdolność pianobetonu z dodatkiem PCM do akumulacji/oddawania ciepła.

Niewątpliwą **wadą ultralekkich pianobetonów jest duży skurcz**, który jest związany ze znaczną ilością wody zawartą w świeżym kompozycie, dużą porowatością oraz brakiem kruszywa [23, 24]. Przeprowadzone badania pianobetonu o gęstości objętościowej 240 kg/m^3 wykazały jego duży skurcz (rysunek 2), który może być przyczyną zarysowań skurczowych i związanych z tym problemów produkcyjnych [17]. Odkształcenia skurczowe, zmierzone po 50 dniach, były zbliżone w obu badanych pianobetonach i wyniosły 5,90‰ (próbki bez PCM) oraz 5,81‰ (próbka z 10% PCM). Badania potwierdziły zatem duży skurcz ultralekkich pianobetonów raportowany w literaturze [23, 24], jak również brak skurczu plastycznego. Jednocześnie, w [17] wykazano, że stosując odpowiednie metody pielęgnacji, można wykonać termoizolacyjne panele z ultralekkiego pianobetonu z dodatkiem PCM bez zarysowań skurczowych. Korzystne działanie materiału zmiennofazowego zostało również potwierdzone w badaniach w komorze starzeniowej, gdzie próbki były poddawane szybkim zmianom temperatury zewnętrznej od +50 do -10°C (rysunek 3). Zmiany temperatury zarejestrowane były w połowie

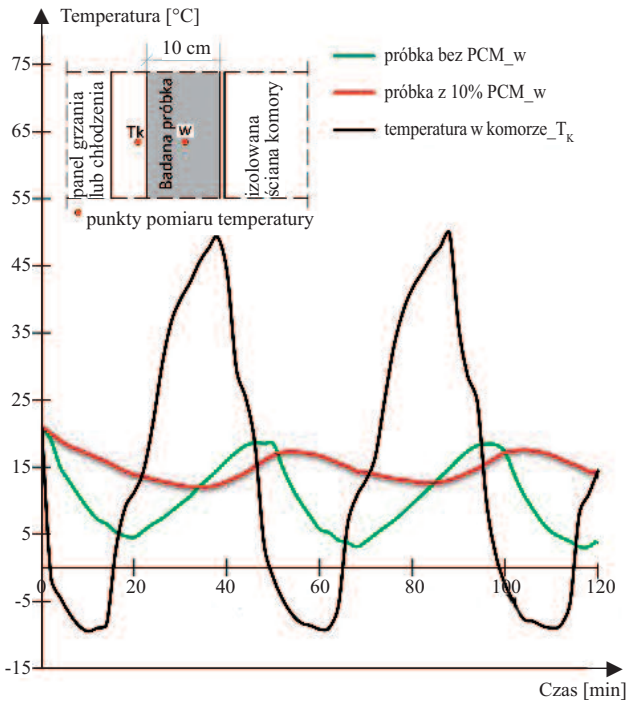


Rys. 1. Ciepło właściwe (Netzsch)
Fig. 1. Heat capacity (Netzsch)



Rys. 2. Rozwój skurczu (SUT)
Fig. 2. Shrinkage development (SUT)

grubości próbek. Wyraźnie widoczny jest efekt działania materiału zmiennofazowego, który powoduje mniejsze wahania temperatury w próbce w porównaniu z próbką referencyjną. Jest to wynik akumulacji ciepła podczas zmiany stanu skupienia PCM, które jest uwalniane w niższej temperaturze i pozwala nie tylko na przesunięcie czasu wystąpienia maksymalnej i mninimalnej temperatury w próbce z PCM w porównaniu z temperaturą zewnętrzną, ale również znacznie zmniejsza wartości temperatury minimalnej i maksymalnej w porównaniu z próbką referencyjną (bez PCM).



Rys. 3. Rozkład temperatury w próbkach poddanych cyklom grzanie/chłodzenie (SUT)
Fig. 3. Temperature distribution in samples subjected to heating/ /cooling cycles (SUT)

Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań wskazują, że ultralekkie pianobetony z materiałem zmiennofazowym (PCM) mają potencjał do stosowania ich jako materiałów termoizolacyjnych. Opracowany w ramach projektu NRG-STORAGE ultralekki pianobeton z PCM charakteryzuje się wystarczającą wytrzymałością mechaniczną, dobrymi właściwościami termofizycznymi oraz zdolnością do akumulacji i oddawania ciepła. Dodatek 10% PCM do pianobetonu obniża jego wytrzymałość na ściskanie o ok. 10%, zmniejsza współczynnik przewodzenia ciepła o ok. 6% oraz nieznacznie redukuje odkształcenia skurczowe w porównaniu z pianobetonem referencyjnym o tej samej gęstości. Wstępne badania pianobetonu z dodatkiem 10% PCM poddanego szybkim cyklom grzanie/chłodzenie oraz przeprowadzone symulacje komputerowe [12, 13, 18] potwierdziły natomiast, że materiał ten może przyczynić się do utrzymania stabilnej temperatury wewnątrz budynków, redukując zapotrzebowanie na energię do chłodzenia lub ogrzewania. Dalsze prace badawcze powinny być ukierunkowane na badanie trwałości pianobetonu z PCM. Istotnym zagadnieniem w kontekście redukcji emisji CO_2 byłoby również zastąpienie cementu portlandzkiego cementami niskoemisyjnymi.

Literatura

[1] European Council: Fit for 55 package; https://www. consilium. uropa. eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/.

[2] Dean B, Dulac J, Petrichenko K, Graham P. Towards Zero-Emission Efficient and Resilient Buildings. Global Status Report (GABC), 2016.

[3] European Commission. Energy Use in Buildings; https://ec. europa. eu/energy/eu-buildingsfactsheets- topics-tree/energy-use-buildings_en.

[4] European Commission; https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling_en.

[5] Kadela M, Winkler-Skalna A, Łoboda B, Kukiełka A. Pianobeton – charakterystyka materiałowa oraz możliwości zastosowania. Materiały Budowlane. 2015; DOI: 10.15199/33.2015.07.30.

[6] Kadela M, Kukiełka A, Winkler-Skalna A. Ocena nasiąkliwości i mrozoodporności pianobetonu. Materiały Budowlane. 2016; DOI 10.15199/33.2016.10.16.

[7] Fu Y, Wang X, Wang L, Li Y. Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the--Practice Review. Adv. Mater. Sci. Eng. 2020; https://doi. org/10.1155/2020/6153602.

[8] Amran YHM, Farzadnia N, Abang Ali AA. Properties and applications of foamed concrete; a review. Constr Build Mater. 2015; https://doi. org/10.1016/j. conbuildmat. 2015.10.112.

[9] Gołaszewski J, Klemczak B, Smolana A, Gołaszewska M, Cygan G, Mankel C, Peralta I, Röser F, Koenders EAB. Effect of Foaming Agent, Binder and Density on the Compressive Strength and Thermal Conductivity of Ultra-Light Foam Concrete, Buildings. 2022; https://doi.org/10.3390/buildings12081176.

[10] Gołaszewski J, Klemczak B, Smolana A, Gołaszewska M, Cygan G, Mankel C, Peralta I, Röser F, Koenders E. Wpływ rodzaju środka pianotwórczego na właściwości pianobetonu o bardzo małej gęstości. Materiały Budowlane. 2022; DOI: 10.15199/33.2022.07.08.

[11] Pizoń J. Fresh, Mechanical, and Thermal Properties of Cement Composites Containing Recycled Foam Concrete as Partial Replacement of Cement and Fine Aggregate. Mater. 2023; https://doi. org/10.3390/ma16227169

[12] Fachinotti VD, Bre F, Mankel C, Koenders E, Caggiano A. Optimization of Multilayered Walls for Building Envelopes Including PCM-Based Composites. Mater. 2020; https://doi. org/10.3390/ma13122787.

[13] Zhilyaev D, Fachinotti VD, Zanoni F, Ortega A, Goracci A, Mankel C, Koenders E, Jonkers HM. Early-stage analysis of a novel insulation material based on MPCM-doped cementitious foam: Modelling of properties, identification of production process hotspots and exploration of performance trade-offs. Dev. Built Environ. 2023; https://doi.org/10.1016/j.dibe. 2023.100243.

[14] NRG – STORAGE. Integrated Porous Cementitious Nanocomposites In Non-Residential Building Envelopes For Green Active/Passive Energy Storage, https://nrg-storage. eu/.

[15] Sam M, Caggiano A, Dubyey L, Dauvergne JL, Koenders E. Thermo-physical and mechanical investigation of cementitious composites enhanced with microencapsulated phase change materials for thermal energy storage. Constr Build Mater. 2022; https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat. 2022.127585.

[16] Erkizia E, Strunz C, Dauvergne JL, Goracci G, Peralta I, Serrano A, Ortega A, Alonso B, Zanoni F, Düngfelder M, Dolado JS, Gaitero JJ, Mankel C, Koenders E. Cement Based Materials with PCM and Reduced Graphene Oxide for Thermal Insulation for Buildings. Intern. RILEM Conf. SYNERCRETE, Springer Nature Switzerland, Cham, 2023, s. 1264–1276.

[17] Klemczak B, Gołaszewski J, Cygan G, Smolana A, Gołaszewska M, Analysis of Methods Reducing Early Age Shrinkage of Ultra-light Foam Concrete with Phase Change Material. Intern. RILEM Conf. SYNERCRETE, Springer Nature Switzerland, Cham, 2023, s. 1143–1152.

[18] Červenka J, Herzfeldt M, Caggiano A, Koenders E. Evaluation of thermal and mechanical properties of demonstration wall utilizing phase change cementitious materials. Ac. Polyt. CTU Proc. 2022; https://doi.org/10.14311/APP. 2022.38.0502.

[19] Microtek Laboratories, inc. https://www.microteklabs.com/product-data-sheets/.

[20] Applied Precision Ltd, ISOMET 2114 Thermal properties analyser User's Guide, Bratislava, SLOVAKIA, 2011.

[21] NETZSCH Geratebau GMBH. https://analyzing-testing. netzsch. com/pl/produkty/thermal-conductivity.

[22] Schleibinger Geräte. Schleibinger Shrinkage-Drain. 2017.

[23] Nambiar E, Ramamurthy K. Shrinkage Behavior of Foam Concrete. J Mater Civ Eng. 2009; https://doi.org/10.1061/(ASCE) 0899-1561 (2009) 21: 11 (631).

[24] Zhao W, Su Q, Wang W, Niu L, Liu T. Experimental Study on the Effect of Water on the Properties of Cast In Situ Foamed Concrete. Adv. in Mat. Sc. Eng. 2018; https://doi. org/10.1155/2018/7130465.

Informacja o finansowaniu

*Przedstawione w artykule badania zostały wykonane w ramach projektu EU Horyzont 2020, nr GA 870114, pt.: „Integrated Porous Cementitious Nanocomposites In Non-**R**esidential **B**uilding **E**nvelopes For **G**reen Active/Passive Energy **Storage (NRG-STORAGE)**.*

Przyjęto do druku: 29.01.2024 r.