

dr inż. Katarzyna Nowak<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0003-4902-4751

dr inż. Anna Zastawna-Rumin<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-4442-6559

dr inż. Annie Sweetlin Jebarani<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-8303-5166

# Application of PCM enhanced concrete panels as a component that reduces space overheating

## *Zastosowanie paneli betonowych, z materiałem zmiennofazowym, jako komponentu pozwalającego na ograniczenie przegrzewania budynku*

DOI: 10.15199/33.2024.12.24

**Abstract.** The article presents the results of preliminary research on the use of PCM-enhanced lightweight concrete panels as a component that helps reduce building overheating. The results of research on the thermal conductivity of concrete slabs using pumice aggregate impregnated with dodecanol (lauryl alcohol), an organic material that changes phase at +24°C. It has been shown that the use of concrete slabs containing 4% PCM mass as an internal finishing layer in building elements significantly increases the thermal capacity of the building, which translates into a change in its thermal characteristics. Computer simulations were also carried out for a simple model of a building with a lightweight wooden structure. The influence of the type of internal cladding on the thermal comfort of rooms in the summer period was analyzed, taking into account night cooling. The results indicated that the use of 3.5 cm thick PCM concrete slabs, compared to traditional plasterboards, effectively limits the increase in temperature inside the rooms and significantly reduces the duration of conditions causing thermal discomfort.

**Keywords:** space overheating; thermal capacity; phase change materials – PCM.

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano wyniki wstępnych badań paneli z lekkiego betonu zawierającego materiał zmiennofazowy (PCM) jako komponentu pozwalającego na ograniczenie przegrzewania budynku, w tym m.in. współczynnika przewodzenia ciepła płyt betonowych z PCM. Zastosowano w nich kruszywo pumeksove nasączone dodekanolem (alkoholem laurylowym), materiałem organicznym, w przypadku którego temperatura przemiany fazowej wynosi +24°C. Wykazano, że wykorzystanie płyt betonowych zawierających 4% masy PCM, jako wewnętrznej warstwy wykończeniowej w elementach budowlanych, wpływa w istotny sposób na redukcję dobowych wahań temperatury. Przeprowadzono symulacje komputerowe prostego modelu budynku o lekkiej konstrukcji drewnianej. Analizowano wpływ rodzaju wewnętrznej okładziny na komfort termiczny pomieszczeń w okresie letnim, uwzględniając nocne chłodzenie. Wyniki wskazały, że zastosowanie betonowych płyt z PCM o grubości 3,5 cm skutecznie ogranicza wzrost temperatury wewnątrz pomieszczeń i znacznie redukuje czas trwania warunków powodujących dyskomfort cieplny w porównaniu z tradycyjnymi płytami gipsowo-kartonowym.

**Słowa kluczowe:** przegrzewanie przestrzeni; pojemność cieplna; materiały zmiennofazowe – PCM.

The ongoing climate changes and the growing requirements of building residents regarding internal comfort lead to the increasingly frequent use of active cooling systems. This situation certainly increases the initial investment costs and increases energy consumption during the use of buildings. The need to reduce energy consumption in construction, while ensuring adequate thermal comfort, forces the search for passive solutions that can improve the quality of the microclimate [1, 2]. In low-energy construction, where the basic goal is to achieve the lowest possible energy demand, the aspect of heat capacity becomes particularly important [3, 4].

Zachodzące zmiany klimatyczne oraz zwiększające się wymagania mieszkańców budynków, dotyczące komfortu wewnętrznego, prowadzą do coraz częstszego stosowania aktywnych systemów chłodzenia. Taka sytuacja z pewnością powoduje wzrost początkowych kosztów inwestycyjnych oraz zwiększa zużycie energii w trakcie użytkowania budynków. Konieczność zmniejszenia zużycia energii w budownictwie, przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniego komfortu cieplnego, wymusza poszukiwanie pasywnych rozwiązań, które mogą poprawić jakość mikroklimatu [1, 2]. W budownictwie niskoenergetycznym, gdzie podstawowym celem jest osiągnięcie jak najniższego zapotrzebowania na energię, aspekt pojemności cieplnej staje się szczególnie istotny [3, 4].

Jednym z rozwiązań jest wykorzystanie materiałów zmieniających stan skupienia (PCM), które umożliwiają zwiększenie zdolności budynku do magazynowania energii cieplnej [5–8].

<sup>1)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

<sup>2)</sup> Velammal College of Engineering and Technology, Department of Civil Engineering, Indie

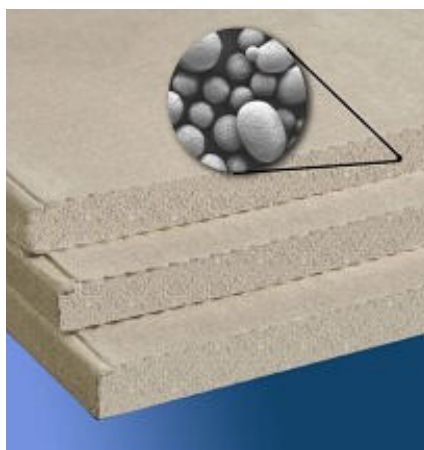
<sup>\*)</sup> Correspondence address: katarzyna.nowak@pk.edu.pl

One of the solutions is the use of state-changing materials (PCM), which enable increasing the building's ability to store thermal energy [5–8]. The introduction of PCM, especially in lightweight buildings, allows for reduced temperature fluctuations inside rooms, which helps reduce overheating and reduces energy demand and peak power of the cooling system.

The method of full integration of PCM with building partition materials is very popular. Already in the 1980s, attempts were made to directly mix PCM with materials such as gypsum or cement or to saturate porous materials with a phase change material [9–11]. Later, encapsulated forms of PCM in the form of microgranules were used [12, 13–15]. Ready-made products have also been created, such as plasterboards made of PCM [5,18] (photo 1), flexible mats (photo 2) [19] or aluminum plates filled with concentrated PCM [5] (photo 3).

Wprowadzenie PCM, szczególnie w budynkach o lekkiej konstrukcji, pozwala na zmniejszenie wahań temperatury wewnątrz pomieszczeń, co pomaga ograniczyć przegrzewanie i zmniejszyć zapotrzebowanie na energię oraz moc szczytową systemu chłodzenia.

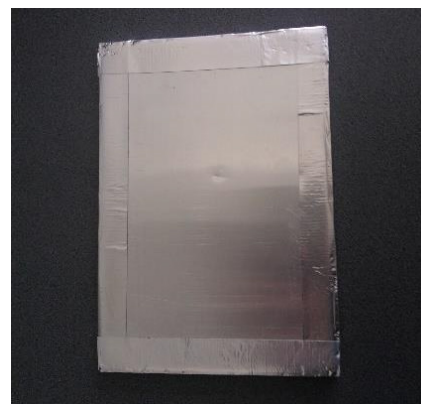
Dużą popularnością cieszy się metoda pełnej integracji PCM z materiałami przegród budowlanych. Już w latach osiemdziesiątych XX w. odnotowano próby bezpośredniego mieszania PCM z materiałem takim, jak gips czy cement oraz nasycanie porowatych wyrobów materiałem zmiennofazowym [9–11]. W późniejszym okresie wykorzystywano kapsułkowane formy PCM w postaci mikrogranulatu [12, 13–15]. Powstały również gotowe produkty, takie jak płyty gipsowo-kartonowe z PCM [5, 16] (fotografia 1), elastyczne maty (fotografia 2) [17] czy aluminiowe płyty wypełnione skoncentrowaną postacią PCM [5] (fotografia 3).



**Photo 1. PCM enhanced plasterboard [18]**  
*Fot. 1. Płyta gipsowo-kartonowa PCM [18]*



**Photo 2. BioPCM Mat [5]**  
*Fot. 2. Maty bioPCM z materiałem zmiennofazowym [5]*



**Photo 3. Aluminium panel filled with PCM® [5]**  
*Fot. 3. Aluminiowe płyty wypełnione skoncentrowaną postacią PCM® [5]*

Due to the limitations of existing PCM applications, the authors attempted to create a new product in the form of simple-to-make concrete wall panels containing a phase change material. The subject of the article is the presentation of a new material, preliminary results of research on its thermal properties and the results of computer simulations of a model of an office building using light construction technology, equipped with storage panels. A significant barrier to the dissemination of this technology is still the high cost of materials containing PCM. They are related to the limited scale of their production and application in construction, but also to the cost of the PCM itself. A barrier of a completely different nature is the contradiction that appears when trying to combine lightweight construction technology with massive storage elements. However, it seems that the operational advantages of such a mixed solution, analyzed in the technical life cycle of the building, will outweigh the disadvantages related to the increased energy consumption of production or the transport of massive elements. Concrete panels, which are not elements of the building structure, can be used at any stage of construction or even use of a light building if other methods of interior protection fail or become too energy-intensive and expensive. The article,

W związku z ograniczeniami istniejących aplikacji PCM podjęliśmy próbę stworzenia nowego produktu w formie prostych do wykonania betonowych paneli ściennych zawierających materiał zmiennofazowy. Przedmiotem artykułu jest prezentacja nowego materiału, wstępnych wyników badań jego właściwości termicznych oraz wyników symulacji komputerowych modelu budynku biurowego w lekkiej technologii konstrukcyjnej, wyposażonego w panele akumulacyjne. Istotną barierą w rozpowszechnieniu tej technologii są wciąż wysokie koszty materiałów zawierających PCM. Są one związane z ograniczoną skalą ich produkcji i aplikacji w budownictwie, ale także z kosztem samego PCM. Bariera zupełnie innej natury jest łączenie lekkiej konstrukcji z masywnymi elementami akumulacyjnymi. Wydaje się jednak, że zalety eksploatacyjne takiego mieszanego rozwiązania, analizowane w cyklu życia technicznego budynku, będą przeważały nad wadami związanymi ze zwiększoną energochłonnością wytwarzania czy transportem masywnych elementów obudowy. Panele betonowe, niebędące elementami konstrukcji budynku, mogą być stosowane na dowolnym etapie wznoszenia czy nawet użytkowania lekkiego obiektu, jeśli inne metody ochrony wnętrza zawiodą lub staną się zbyt energochłonne i kosztowne. W artykule, którego głównym mo-

whose main theme is the thermal effectiveness of the use of storage panels, did not analyze the strength aspects of their mechanical connection to the building structure.

### Material characteristics

**Material description.** The design of the concrete mixture used to create the panels was made in accordance with the guidelines for C16/20. The ingredients of the mixture are: cement, coarse aggregate with a diameter of up to 20 mm (of which 25% is gravel and 75% pumice), fine aggregate with a diameter of up to 10 mm (pumice) and sand. The pumice aggregate was saturated with phase change material. Dodecanol 98% [19] was used as the PCM, an organic compound with the chemical formula  $C_{12}H_{26}O$ , whose phase change temperature is 24°C and the heat of change is 180 kJ/kg. The boiling point of dodecanol is 259°C and the flash point is 127°C [20].

An opportunity to overcome the previously mentioned technological and economic barrier is a simple method of introducing PCM into concrete [21, 22] by natural soaking of porous pumice aggregate. Impregnation was carried out by immersing the pumice in Dodecanol for 24 hours at 40°C and draining it for 2.5 hours. Then, the samples were seasoned in laboratory conditions until the mass difference between subsequent measurements was less than 0.1%. As a result of the impregnation, a 4% mass share of Dodecanol in the final product was achieved.

Material samples were created from such a designed lightweight concrete mixture with the addition of PCM for further tests, including thermal ones (photo 4).

For a given concrete sample, additional microscopic observations were made using a digital microscope, using 20x and 100x magnifications for a detailed microstructural analysis of the material (photo 5).

Thermal conductivity measurements of the prepared samples were carried out in various temperature ranges to thoroughly analyze the impact of phase transformation on the thermal properties of the material. The thermal conductivity coefficient of the new material was measured in a FOX 314 plate apparatus.

The tests were carried out at an average temperature of +10°C (+20°C and 0°C), i.e. in conditions below the phase change temperature. The value of the thermal conductivity coefficient obtained from measurement

in these conditions was 0.776 W/mK. The thermal conductivity test was also performed un-



**Photo 4. Cross-section of a sample of lightweight concrete with the addition of PCM, seasoned in a climatic chamber**

*Fot. 4. Przekrój próbki z lekkiego betonu z dodatkiem PCM, sezonowanej w komorze klimatycznej*

tywem jest termiczna skuteczność stosowania paneli akumulacyjnych, nie analizowano aspektów wytrzymałościowych ich mechanicznego łączenia z konstrukcją budynku.

### Charakterystyka materiału

Projekt mieszanki betonowej, użytej do stworzenia paneli, został wykonany zgodnie wytycznymi dotyczącymi C16/20. Składniki mieszanki to: cement; grube kruszywo o średnicy do 20 mm (z czego 25% stanowi żwir, a 75% pumeks); drobne kruszywo o średnicy do 10 mm (pumeks) oraz piasek. Kruszywo pumeksowe nasączono materiałem zmiennofazowym. Jako PCM zastosowano dodekanol 98% [19], związek organiczny o wzorze chemicznym  $C_{12}H_{26}O$ , którego temperatura przemiany fazowej wynosi 24°C, a ciepło przemiany 180 kJ/kg. Temperatura wrzenia dodekanolu wynosi 259°C, natomiast temperatura zapłonu 127°C [20].

Szansą na przewyżczenie wspomnianej bariery technologicznej i ekonomicznej jest prosta metoda wprowadzania PCM do betonu [21, 22] przez naturalne nasączenie porowatego kruszywa pumeksowego. Impregnację przeprowadzono przez zanurzenie pumeksu w dodekanolu przez 24 h w temperaturze 40°C i odsączenie go przez 2,5 h. Następnie próbki sezonowano w warunkach laboratoryjnych aż do uzyskania różnicy masy między kolejnymi pomiarami, wynoszącej mniej niż 0,1%. W wyniku przeprowadzonej impregnacji osiągnięto udział dodekanolu w finalnym produkcie wynoszący 4% masy. Z tak zaprojektowanej lekkiej mieszanki betonowej z dodatkiem PCM utworzono próbki do dalszych badań, m.in. termicznych (fotografia 4).

W przypadku danej próbki betonowej wykonano dodatkowe obserwacje mikroskopowe przy użyciu mikroskopu cyfrowego, stosując powiększenia 20x oraz 100x w celu szczegółowej analizy mikrostrukturalnej materiału (fotografia 5).

**Wyniki wstępnych badań eksperymentalnych.** Przeprowadzono pomiary przewodności cieplnej przygotowanych próbek w zróżnicowanym zakresie temperatury, aby dokładnie przeanalizować wpływ przemiany fazowej na właściwości termiczne materiału. W aparacie płytowym FOX 314 przeprowadzono



**Photo 5. Photo at magnification**

*Fot. 5. Próbką w powiększeniu*

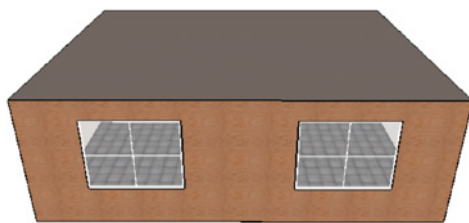
miar współczynnika przewodzenia ciepła nowego materiału. Badania prowadzono w średniej temperaturze +10°C (+20°C i 0°C), a więc w warunkach poniżej temperatury przemiany fazowej. Uzyskana z pomiaru w tych warunkach wartość współczynnika przewodzenia ciepła wynosi 0,776 W/mK. Badanie przewodności cieplnej wykonano

der conditions of complete melting of the phase material, i.e. at an average temperature of +30°C, obtained by heating the lower plate of the apparatus to +25°C and the upper plate to 35°C. However, the value of the thermal conductivity coefficient of concrete with light aggregate, enriched with 4% phase change material, did not change.

## Calculating model

**Building model description.** A model of a simplified test building being used as office space was created in Design Builder. The dimensions of the modeled building are 6 m × 8 m × 2.7 m (Fig. 1). The window area meets the requirement for the minimum area

of windows in rooms intended for people, i.e. the ratio of their area to the floor area is 1 : 8 [23]. However, the windows are located only in the southern wall. This is related to the possibility of obtaining significant



**Fig. 1. Design builder model, cross-section of the wall**

*Rys. 1. Model budynku, przekrój przez ścianę*

energy gains in the winter, and at the same time allows for a rational reduction of the thermal load of the modeled facility in the summer. Thus, two windows constitute a total of 27% of the area of the southern façade.

The building is made of a light wooden structure, which consists of walls made using wooden frame technology, covered with facade boards on the outside and filled with a 24-centimeter layer of styrofoam. In the initial variant, the internal finishing layer of the external and internal walls are plasterboards. The values of the heat transfer coefficients of the partitions are as follows:

- external wall  $U = 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,
- flat roof:  $U = 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,
- slab on ground:  $U = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,
- windows:  $U = 0,90 \text{ W/m}^2\text{K}$

The model consists of two symmetrical rooms, separated by a partition wall made of plasterboards on an aluminum frame.

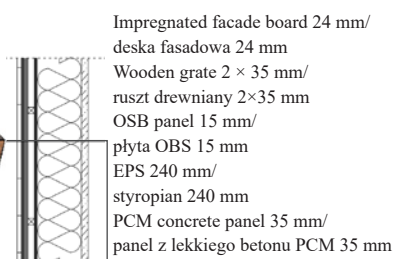
In the variant in which the effect of using PCM is analyzed, the plasterboards on the inner surface of the external walls and the flat roof were replaced with the panels described above with the addition of phase change material, 3.5 cm thick. It was assumed that the internal wall would be covered on both sides with concrete panels with the addition of PCM.

The simulations assumed that the modeled building is used as an office and operated from 8:00 a.m. to 6:00 p.m. The building is not equipped with a mechanical cooling system, the temperature inside is a function of the climate, type of use and thermal properties of the casing. The only way to cool the interior during the hot period of the year is intensive ventilation with outside air at night. The ventilation airflow

także w warunkach pełnego roztopienia materiału fazowego, tj. w średniej temperaturze +30°C, uzyskanej przez nagrzewanie płyty dolnej aparatu do temperatury +25°C, a płyty górnej do 35°C. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła betonu z lekkim kruszywem, wzbogaconego dodatkiem 4% materiału zmiennofazowego, nie uległa jednak zmianie.

## Model obliczeniowy

**Opis modelu budynku.** W programie Design Builder stworzono model uproszczonego budynku testowego o wymiarach 6×8×2,7 m (rysunek 1) użytkowanego jako pomieszczenia biurowe. Powierzchnia okien spełnia warunek dotyczący minimalnej



powierzchni okien w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi, tj. stosunek ich powierzchni do powierzchni podłogi wynosi 1 : 8 [23]. Okna są jednak zlokalizowane tylko w ścianie południowej. Jest to związane z możliwością osiągnięcia znacznych zysków energetycznych w okresie zimowym, a jednocześnie pozwala racjonalnie ograniczyć ciepłe obciążenie modelowanego obiektu w okresie letnim. Tym samym dwa okna stanowią w sumie 27% powierzchni elewacji południowej.

Zamodelowany budynek charakteryzuje się lekką konstrukcją drewnianą, którą stanowią ściany wykonane w technologii szkieletu drewnianego, pokryte z zewnątrz deskami elewacyjnymi oraz wypełnione warstwą styropianu grubości 24 cm. W wariantcie wyjściowym wewnętrzną warstwą wykończeniową ścian zewnętrznych i wewnętrznych są płyty gipsowo-kartonowe. Wartość współczynnika przenikania ciepła przegród jest następująca:

Zamodelowany budynek charakteryzuje się lekką konstrukcją drewnianą, którą stanowią ściany wykonane w technologii szkieletu drewnianego, pokryte z zewnątrz deskami elewacyjnymi oraz wypełnione warstwą styropianu grubości 24 cm. W wariantcie wyjściowym wewnętrzną warstwą wykończeniową ścian zewnętrznych i wewnętrznych są płyty gipsowo-kartonowe. Wartość współczynnika przenikania ciepła przegród jest następująca:

- ściana zewnętrzna  $U = 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;
- stropodach:  $U = 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;
- podłoga na gruncie:  $U = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;
- okna:  $U = 0,90 \text{ W/m}^2\text{K}$

Obiekt składa się z dwóch symetrycznych pomieszczeń, oddzielonych od siebie ścianą działową wykonaną z płyt gipsowo-kartonowych na stelażu aluminiowym. W wariantcie, w którym analizowany jest efekt zastosowania PCM, płyty gipsowo-kartonowe na wewnętrznej powierzchni ścian zewnętrznych oraz stropodachu zastąpiono opisanymi wcześniej panelami z dodatkiem materiału zmiennofazowego, o grubości 3,5 cm. Założono, że ściana wewnętrzna obłożona będzie obustronnie panelami betonowymi z dodatkiem PCM.

W symulacjach przyjęto, że modelowany obiekt jest wykorzystywany jako biuro i użytkowany w godzinach 8.00–18.00. Budynek nie jest wyposażony w system chłodzenia mechanicznego, temperatura we wnętrzu jest funkcją klimatu, sposobu użytkowania oraz właściwości termicznych obudowy. Jedyną

required during office work was assumed in accordance with the PN-EN 16798-1 standard [24] as for category II buildings with low levels of pollutant emissions. The calculated ventilation air rate from 5:00 a.m. to 6:00 p.m. is  $2.3 \text{ h}^{-1}$ . During the remaining period, when very intensive ventilation of the rooms is possible due to the lack of users of the building, the number of air changes was assumed to be  $6.6 \text{ h}^{-1}$ . The building is equipped with mechanical ventilation. The model includes the option of protecting the interior against excessive cooling during the night by automatically turning off the mechanical ventilation when the internal air temperature drops below  $18^\circ\text{C}$ . The assumed infiltration air rate results from the recommendations for the tightness of the building envelope with mechanical ventilation, i.e. the value of the coefficient  $n_{50} = 1.5 \text{ h}^{-1}$  [23].

Internal gains were calculated assuming the use of the facility by 5 people from 8:00 a.m. to 6:00 p.m. and the operation of computer equipment (5 laptops) and a photocopier during this period. In total, the operational thermal load was assumed to be  $20 \text{ W/m}^2$ .

Employees perform light office work, which corresponds to a metabolic activity of  $120 \text{ W/person}$ .

Only the warmest months of the summer period were used for simulation calculations: July and August. It was assumed that the building is located in Kraków.

**Simulation results.** The main aspect of the undertaken simulation analyzes is the assessment of the room's microclimate conditions, with emphasis on the obtained thermal comfort conditions. Thermal comfort plays a key role in the subjective perception of the surrounding environment, especially in the context of closed spaces such as residential, office and public buildings.

One of the indicators that allows for assessing of thermal comfort is the operating temperature. According to the definition, it determines the temperature of a black, temperature-homogeneous environment in which a person, due to radiation and convection, exchanges the same amount of heat as in the compared, temperature-homogeneous real environment. This indicator includes the total impact of air temperature and average ambient radiation temperature on humans, but does not take into account the impact of other physical variables.

The beneficial effects of increased heat capacity can be rationally analyzed by taking into account the values of the operational temperature in both analyzed variants of the modeled object, Fig. 2. The operational temperature, combining the air temperature and radiation temperature, approximates human thermal sensations much better than the air temperature itself.

In the case of a light gypsum cladding, the maximum daily fluctuations in the operating temperature reach  $15 \text{ K}$ , while in a room with PCM concrete slabs they do not exceed  $8 \text{ K}$ . The significantly reduced amplitude applies not only to the maximum values, but also to the minimum values related to intensive night cooling. The computational model imposed a condition regarding the minimum air temperature in the building at night ( $18^\circ\text{C}$ ) and hence such conditions occur in

formą chłodzenia wnętrza w gorącym okresie roku jest intensywne wentylowanie powietrzem zewnętrznym w nocy. Ilość powietrza wentylacyjnego wymaganą podczas pracy biurowej przyjęto zgodnie z normą PN-EN 16798-1 [24] jak w przypadku II kategorii budynku o niskim poziomie emisji zanieczyszczeń. Obliczona ilość powietrza wentylacyjnego w godzinach 5.00–18.00 wynosi  $2,3 \text{ h}^{-1}$ . W pozostałym okresie, w którym możliwe jest bardzo intensywne wentylowanie pomieszczeń, ze względu na brak użytkownika budynku przez ludzi, przyjęto ilość wymian powietrza na poziomie  $6,6 \text{ h}^{-1}$ . W budynku założono wyposażenie w wentylację mechaniczną. W modelu uwzględniono opcję ochrony wnętrza przed nadmiernym schłodzeniem w trakcie nocy poprzez automatyczne wyłączenie wentylacji mechanicznej w momencie obniżenia się temperatury powietrza wewnętrznego poniżej  $18^\circ\text{C}$ . Przyjęta ilość powietrza infiltrującego wynika z zaleceń dotyczących szczelności obudowy budynku z wentylacją mechaniczną, tj. wartości współczynnika  $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$  [23].

Zysk wewnętrzny ciepła został obliczony przy założeniu użytkownika obiektu przez 5 osób w godzinach 8.00–18.00 oraz działania w tym okresie sprzętu komputerowego (5 laptopów) i kserokopiarki. Łącznie przyjęto, że eksploatacyjne obciążenie cieplne wynosi  $20 \text{ W/m}^2$ . Pracownicy wykonują lekką pracę biurową, której odpowiada aktywność metaboliczna  $120 \text{ W/osobę}$ . Do obliczeń symulacyjnych przyjęto jedynie najcieplejsze miesiące okresu letniego: lipiec, sierpień. Założono, że budynek będzie zlokalizowany w Krakowie.

**Wyniki symulacji.** Głównym aspektem podjętych analiz symulacyjnych jest ocena warunków mikroklimatu pomieszczenia z naciskiem na uzyskane warunki komfortu cieplnego. Komfort cieplny odgrywa kluczową rolę w subiektywnym odbiorze otaczającego środowiska, szczególnie w kontekście przestrzeni zamkniętych, takich jak budynki mieszkalne, biurowe czy użyteczności publicznej.

Jednym ze wskaźników pozwalającym ocenić komfort cieplny jest temperatura operatywna. Zgodnie z definicją określa ona temperaturę czarnego, jednorodnego temperaturowo środowiska, w którym znajdujący się człowiek wymienia taką samą ilość ciepła na skutek promieniowania i konwekcji, jaką wymienia w porównywanym, niejednorodnym temperaturowo środowisku rzeczywistym. Wskaźnik ten ujmuje łączne oddziaływanie na człowieka temperatury powietrza oraz średniej temperatury promieniowania otoczenia, natomiast nie uwzględnia wpływu innych zmiennych fizycznych.

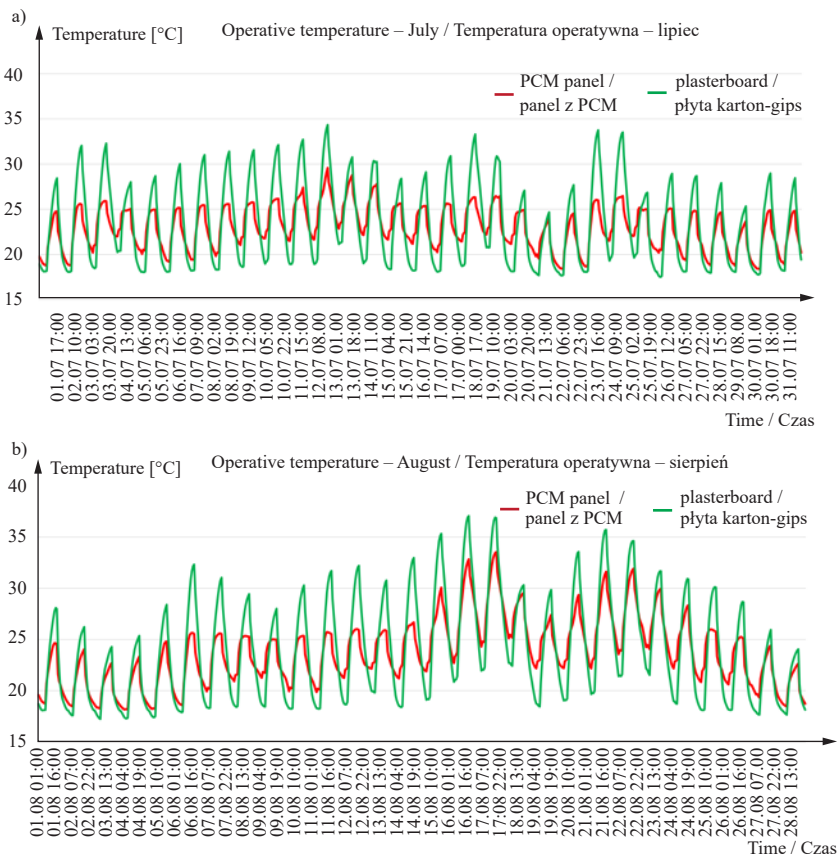
Korzystne efekty zwiększonej pojemności cieplnej można racjonalnie analizować, biorąc pod uwagę wartości temperatury operatywnej w obu analizowanych wariantach modelowanego obiektu (rysunek 2). Temperatura operatywna, łącząca temperaturę powietrza i promieniowania, znacznie lepiej przybliża ludzkie odczucia cieplne niż sama temperatura powietrza.

W przypadku lekkiej okładziny gipsowej maksymalne dobowe wahania temperatury operatywnej sięgają  $15 \text{ K}$ , podczas gdy w pomieszczeniu z płytami betonowymi PCM nie przekraczają  $8 \text{ K}$ . Znacznie zmniejszona amplituda dotyczy nie tylko wartości maksymalnych, ale również minimalnych, związanych z intensywnym chłodzeniem nocnym. Model obliczeniowy narzucił warunek dotyczący minimalnej temperatury powietrza w budynku w nocy ( $18^\circ\text{C}$ ) i dlatego takie warunki występują w symu-

the simulated space almost every day, Fig. 2. Intensive night cooling of the interior is desirable in the perspective of another hot day, but may cause discomfort in the morning hours. A compromise solution in this situation is to adapt the insulation of clothing to changing conditions. For this purpose, the model assumed an increased level of clothing resistance in the first hours of office work. Increased energy storage is beneficial in this situation, significantly shortening or even eliminating the morning overcooling of the building space below 20°C.

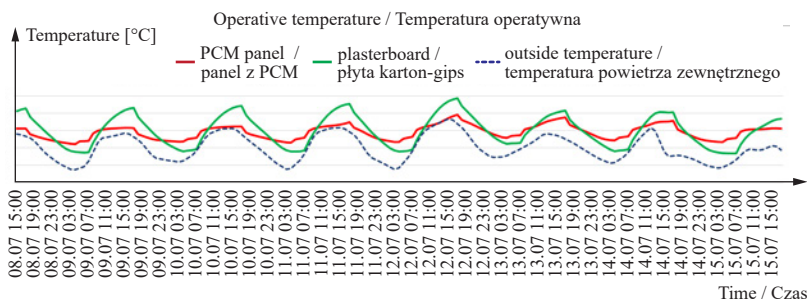
A more detailed analysis of the thermal conditions in the modeled room is possible based on the graphs presented in Fig. 3, 4. The outdoor air temperature and solar gains through the window surfaces, as well as the operational temperature for the two analyzed variants, are shown. In both cases, internal discomfort is observed, but with the increased heat capacity of the PCM boards, milder conditions (or lower cooling load) can be achieved. Importantly, in the variant with PCM plates, night cooling does not cause discomfort in the morning. In the graphs presented in Fig. 4, a characteristic time shift can be observed between the maximum solar gain, the external air temperature and the maximum indoor operating temperature.

For selected hot days of July, daily changes in conditions inside the building as a function of the internal heat load are presented, Fig. 4. Reduced night ventilation intensity at 5:00 a.m. prevents further drops in the operating temperature in the case of using a plasterboard casing, and even a slight increase in the PCM variant. The sudden change



**Fig. 2. Summer (July, August) operative temperature distribution in case of gypsum internal cladding and PCM concrete panel upon walls and ceiling**

*Rys. 2. Letni (lipiec, sierpień) przebieg temperatury operatywnej w przypadku wewnętrznej okładziny gipsowej i płyty betonowej PCM na ścianach i suficie*



**Fig. 3. Operative temperature distribution during selected hot summer days**

*Rys. 3. Przebieg temperatury operatywnej w wybranym okresie gorącego lata*

lowanej przestrzeni niemal każdego dnia (rysunek 2). Intensywne nocne chłodzenie wnętrza jest istotne w perspektywie kolejnego upalnego dnia, ale może powodować dyskomfort w godzinach porannych. Kompromisowym rozwiązaniem w tej sytuacji jest dostosowanie izolacyjności odzieży do zmieniających się warunków. W tym celu model zakładał zwiększony poziom oporności odzieży w pierwszych godzinach pracy biurowej. Zwiększone magazynowanie energii jest korzystne w tej sytuacji, ponieważ znacznie skraca lub nawet eliminuje poranne przechłodzenie przestrzeni budynku poniżej 20°C.

Bardziej szczegółowa analiza warunków cieplnych w modelowanym pomieszczeniu jest możliwa na podstawie wykresów przedstawionych na rysunkach 3 i 4. Pokazano temperaturę powietrza zewnętrznego i zyski słoneczne przez powierzchnie okien, a także temperaturę operatywną w dwóch analizowanych wariantach. W obu przypadkach obserwuje się dyskomfort wewnętrzny, ale dzięki zwiększonej pojemności cieplnej płyt PCM można uzyskać łagodniejsze warunki (lub mniejsze obciążenie chłodnicze). Co ważne, w wariacie z płytami PCM nocne chłodzenie nie powoduje dyskomfortu rano. Na wykresach przedstawionych na rysunku 4 zaobserwowano charakterystyczne przesunięcie czasowe między maksimum zysków słonecznych, temperaturą powietrza zewnętrznego i maksimum

temperatury eksploatacyjnej wewnątrz.

W przypadku gorących dni lipca przedstawiono dzienne zmiany warunków wewnątrz budynku w funkcji wewnętrznego obciążenia cieplnego (rysunek 4). Zmniejszona intensywność

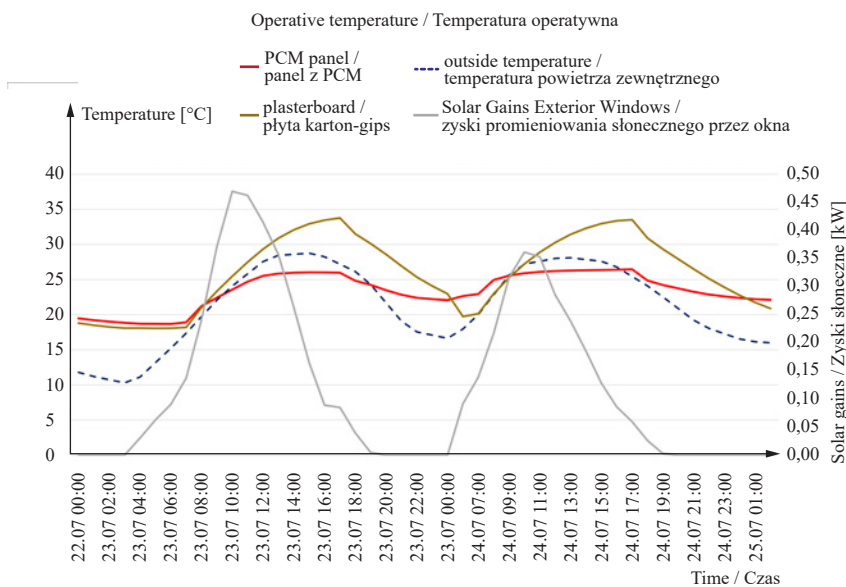
in the slope of the graphs corresponds to the change in the way the room is operated from 8:00 a.m. (heat gains from people and equipment). From this moment, the operational temperature increases in both simulated room variants. In the case of a light building, this increase is intense and lasts until the end of working hours, i.e. until 6:00 p.m. In the case of PCM panels, a significant change in the operating temperature trend at +24°C can be observed. This is related to the intense heat absorption in the melting phase of dodecanol. In the following hours, until the end of the working time, there is a constant but much lower increase in operating temperature than in a light building. A characteristic relationship between the two analyzed graphs is that they intersect twice a day, which results from the different ability to store energy.

Thermal comfort assessment is important both from the perspective of ensuring the well-being of users and the energy optimization of buildings. Two indicators are commonly used in engineering practice and scientific research: PMV (Predictive Mean Vote), i.e. the predicted average rating of thermal comfort, and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), determining the predicted percentage of people dissatisfied with specific thermal conditions.

These indicators were proposed by Fanger and constitute a simple and quick method for assessing thermal comfort. The obtained PMV value is then compared with a 7-point psychophysical scale of thermal sensations: +3 hot; +2 warm; +1 slightly warm; 0 neutral (comfortable); -1 slightly chilly; -2 cool; -3 cold. A comfortable environment in terms of microclimate (so-called moderate) is in the range  $-0.5 < PMV < +0.5$ .

Figures 5 and 6 illustrate the variability of the PMV and PPD indicators in relation to the analyzed building. The results shown in the charts refer only to office usage hours, not the entire simulation period. The lower heat capacity of the gypsum cladding results in a significant increase in the percentage of dissatisfied people. The values of PPD indicators on selected days are several to a dozen times higher comparing to the variant of a more massive wall reinforced with PCM.

Analyzing the course of thermal comfort assessment (fig. 5), both for the solution using PCM panels and plasterboard finishing, the recommended conditions ( $-0.5 < PMV < +0.5$ ) are not obtained throughout the analyzed summer period. However, the



**Fig. 4. Operative temperature distribution during a sunny day**  
 Rys. 4. Przebieg temperatury operatywnej w ciągu dnia słonecznego (23–24.07)

wentylacji nocnej o godzinie 5:00 rano zapobiega dalszemu zmniejszeniu temperatury operatywnej w przypadku zastosowania obudowy gipsowo-kartonowej, a nawet niewielkiemu wzrostowi w wariancie PCM. Gwałtowna zmiana nachylenia wykresów odpowiada zmianie sposobu eksploatacji pomieszczenia od godziny 8:00 rano (zyski ciepła od ludzi i urządzeń). Od tego momentu temperatura operatywna wzra-

sta w obu symulowanych wariantach pomieszczenia. W przypadku budynku lekkiego wzrost ten jest intensywny i trwa do końca godzin pracy, tj. do godziny 18:00. W przypadku paneli PCM można zaobserwować znaczną zmianę trendu temperatury operatywnej przy +24°C. Jest to związane z intensywnym pochłanianiem ciepła w fazie topnienia dodekanolu. W kolejnych godzinach, aż do końca czasu pracy, następuje stały, ale znacznie mniejszy wzrost temperatury operatywnej niż w budynku lekkim. Charakterystyczną zależnością między dwoma analizowanymi wykresami jest to, że przecinają się dwukrotnie w ciągu doby, co wynika z różnej zdolności do magazynowania energii.

Ocena komfortu termicznego jest istotna zarówno z perspektywy zapewnienia dobrego samopoczucia użytkowników, jak i optymalizacji energetycznej budynków. W praktyce inżynierskiej oraz badaniach naukowych powszechnie wykorzystuje się dwa wskaźniki: PMV (Predictive Mean Vote), czyli przewidywana średnia ocena komfortu cieplnego oraz PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), określający przewidywany odsetek osób niezadowolonych z warunków termicznych.

Wskaźniki te zostały zaproponowane przez Fangera i stanowią prostą i szybką metodę oceny komfortu cieplnego. Uzyskaną wartość PMV porównuje się następnie z 7-stopniową psychofizyczną skalą wrażeń cieplnych, +3 gorąco; +2 ciepło; +1 lekko ciepło; 0 neutralnie (komfortowo); -1 lekko chłodno; -2 chłodno; -3 zimno. Środowisko komfortowe pod względem mikroklimatu (tzw. umiarkowane) mieści się w przedziale  $-0.5 < PMV < +0.5$ .

Rysunki 5 i 6 ilustrują zmienność wskaźników PMV i PPD w odniesieniu do analizowanego budynku. Podane na wykresach wyniki dotyczą tylko godzin pracy w biurze, a nie całego okresu symulacji. Mała pojemność cieplna okładziny gipsowej powoduje znaczny wzrost odsetka osób niezadowolonych. Wartości wskaźników PPD w wybranych dniach są kilka do kilkunastu razy większe w porównaniu z wariantem masywniejszej ściany wzmocnionej PCM.

lower heat capacity of the gypsum cladding results in a longer duration of discomfort (over 30%) compared to the variant with more massive materials.

## Summary and conclusions

The effects of using PCM concrete slabs were analyzed by simulating a lightweight building model in Design Builder software. The modeled building uses a simple passive night cooling measure using intensive night ventilation. This procedure is usable when the heat capacity is large enough to efficiently accumulate excess energy during the day.

In the case of a light gypsum cladding, the maximum daily fluctuations of the operating temperature reach 15 K, while in a room with PCM concrete slabs they do not exceed 8 K. The significantly reduced amplitude applies not only to the maximum values, but also to the minimum values related to intensive night cooling. The obtained simulation results confirm a significant reduction in daily temperature fluctuations obtained for the internal PCM lining, and as a result, a reduction in the maximum operating temperature and the duration of discomfort.

The results of preliminary material and simulation tests indicate the great potential of the analyzed solutions, which justifies continuation of works. In the next stages, experimental tests are planned on thinner 2 cm thick PCM concrete slabs, which may constitute a practical alternative for interior finishing in lightweight buildings. Additionally, future research will

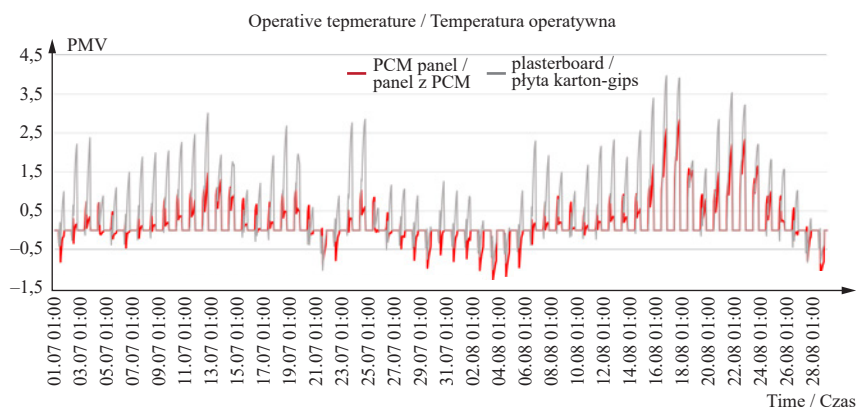
Analizując przebieg oceny komfortu cieplnego (rysunek 5) zarówno w przypadku rozwiązania z zastosowaniem paneli z PCM, jak i wykończenia z płyt gipsowo-kartonowych, nie uzyskujemy rekomendowanych warunków ( $-0,5 < PMV < +0,5$ ) w całym analizowanym okresie letnim. Mała pojemność cieplna okładziny gipsowej powoduje jednak wydłużenie czasu trwania dyskomfortu o ponad 30% w porównaniu z wariantem masywniejszym.

## Podsumowanie i wnioski

Skutki zastosowania płyt betonowych z PCM zostały przeanalizowane przez symulacje lekkiego modelu budynku w oprogramowaniu Design Builder. W modelowanym budynku zastosowano prosty pasywny środek chłodzenia nocnego za pomocą intensywnej wentylacji nocnej. Ta procedura ma sens, gdy pojemność cieplna jest wystarczająco duża, aby skutecznie zbierać nadmiar energii w ciągu dnia.

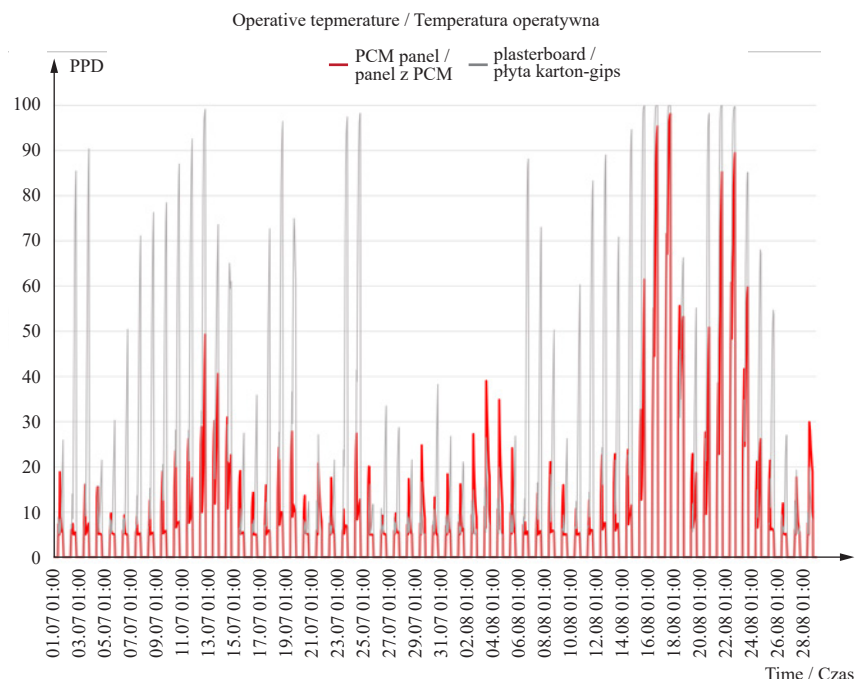
W przypadku lekkiej okładziny gipsowej maksymalne dobowe wahania temperatury operatywnej sięgają 15 K, podczas gdy w pomieszczeniu z płytami betonowymi PCM nie przekraczają 8 K. Znacznie zmniejszona amplituda dotyczy nie tylko wartości maksymalnych, ale również minimalnych, związanych z intensywnym chłodzeniem nocnym. Uzyskane wyniki symulacji potwierdzają znaczną redukcję dobowych wahań temperatury uzyskaną w przypadku wewnętrznej okładziny z PCM, a w rezultacie redukcję maksymalnej temperatury operatywnej i czasu trwania dyskomfortu.

Wyniki wstępnych badań materiałowych i symulacyjnych wskazują na



**Fig. 5. Comparison of PMV distributions – in rooms finished with gypsum boards and PCM panels**

*Rys. 5. Porównanie rozkładu wskaźników PMV w pomieszczeniach wykończonych płytami g-k i panelami z PCM*



**Fig. 6. Comparison of PPD distributions in rooms finished with gypsum boards and PCM panels**

*Rys. 6. Porównanie rozkładu wskaźników PPD w pomieszczeniach wykończonych płytami g-k i panelami z PCM*



focus on the problem of overheating in rooms with large glass surfaces, which opens new directions of research in improving thermal comfort and energy efficiency of buildings.

duży potencjał analizowanych rozwiązań, co uzasadnia kontynuację prac. W kolejnych etapach planowane są badania eksperymentalne cieńszych płyt betonowych z PCM o grubości 2 cm, które mogą stanowić praktyczną alternatywę wykończenia wnętrza w budynkach o lekkiej konstrukcji. Dodatkowo, przyszłe badania skupią się na problemie przegrzewania pomieszczeń o dużych powierzchniach przeszklonych, co otwiera nowe kierunki poszukiwań w celu poprawy komfortu termicznego i efektywności energetycznej budynków.

*This research was financed by the India-Poland intergovernmental program of scientific and technological cooperation, supported by the National Agency for Academic Exchange, grant agreement no.: PPN/BIN/20 19 / 11 00212.*

*Badania zostały sfinansowane w ramach międzyrządowego programu współpracy naukowo-technicznej Indie-Polska, wspieranego przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej, umowa o dotację nr: PPN/BIN/20 19 / 11 00212.*

Received: 02.09.2024 r.

Revised: 28.10.2024 r.

Published: 20.12.2024 r.

Artykuł wpłynął do redakcji: 02.09.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 28.10.2024 r.

Opublikowano: 20.12.2024 r.

## References

- [1] Waqas A, Ud Din Z, "Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings - A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013; (18): 607–625, DOI: 10.1016/j.rser.2012.10.034.
- [2] Soares N, Costa JJ, Gaspar AR, Santos P. "Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency", *Energy and Buildings*, 2013; (59): 82–103, DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.12.042.
- [3] Cabeza LF, Castell A, Barreneche C, de Gracia A, Fernández AI. "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011; (15) 3: 1675–1695, DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.018.
- [4] Santamouris M, Kolokotsa D. "Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art", *Energy and Buildings*, 2013; (57): 74–94, DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.11.002.
- [5] Zastawna-Rumin A. "The analysis of the application efficiency of phase change materials in partitions in Polish low-energy buildings", Doctoral thesis, Cracow University of technology, Cracow, Poland 2018.
- [6] Pielichowska K, Pielichowski K. "Phase change materials for thermal energy storage", *Progress in Materials Science*, 2014 (65) 0: 67–123, DOI: 10.1016/j.pmatsci.2014.03.005.
- [7] Baetens R, Jelle BP, Gustavsen A. "Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review", *Energy and Buildings*, 2010, vol. 42, no. 9, pp. 1361–1368, DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.03.026.
- [8] Navarro L, de Gracia A, Niall D, Castell A, Browne M, McCormack SJ, Griffiths P, Cabeza LF. "Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 2. Integration as passive system", *Renewable Energy*, 2016, vol. 85, January, pp. 1334–1356, DOI: 10.1016/j.renene.2015.06.064.
- [9] Schossing P, Henning H, Gschwander S, Haussmann T. "Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, vol. 89, no. 2–3, pp. 297–306, DOI: 10.1016/j.solmat.2005.01.017.
- [10] Eddhahak-Ouni A, Colin J, Bruneau D. "On an experimental innovative setup for the macro scale thermal analysis of materials : Application to the Phase Change Material (PCM) wallboards", *Energy and Buildings*, 2013, vol. 64, pp. 231–238, DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.05.008.
- [11] Rostamizadeh M, Khanlarkhani M, Sadrameli SM. "Simulation of energy storage system with phase change material (PCM)", *Energy and Buildings*, 2012, vol. 49, pp. 419–422, DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.02.037.
- [12] Kośny J. *PCM- Enhanced Building Components. An application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures*, Springer International Publishing Switzerland, 2015, DOI: 10.1007/978-3-319-14286-9.
- [13] Tyagi VV, Kaushik SC, Tyagi SK, Akiyama T. "Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no. 2, pp. 1373–1391, DOI: 10.1016/j.rser.2010.10.006.
- [14] Shukla N, Fallahi A, Kosny J. "Performance characterization of PCM impregnated gypsum board for building applications", 1st International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, SHC 2012, 9-11 July 2012, ELSEVIER's Energy Procedia, 2012, vol. 30, pp. 370–379, DOI: 10.1016/j.egypro.2012.11.044.
- [15] Persson J, Westermark M., "Phase change material cool storage for a Swedish Passive House", *Energy and Buildings*, 2012, vol. 54, pp. 490–495, DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.05.012.
- [16] Rodriguez-Ubinas E, Arranz BA, Sánchez SV, González FJN. "Influence of the use of PCM drywall and the fenestration in building retrofitting", *Energy and Buildings*, 2013, vol. 65, pp. 464–476, DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.06.023.
- [17] Muruganatham K, Phelan P, Horwath P, Ludlam D, McDonald T. "Experimental Investigation of a Bio-Based Phase Change Material to Improve Building Energy Performance", in *Proceedings of the 2010, 4th International Conference on Energy Sustainability, ASME 2010 17-22 May 2010, Phoenix, USA*, DOI: 10.1115/ES2010-90035.
- [18] <https://materialdistrict.com/material/micronal-pcm>
- [19] Waiching Tang, Zhiyu Wanga, Ehsan Mohseni, Shanyong Wang. "A practical ranking system for evaluation of industry viable phase change materials for use in concrete", *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 177, 272–286, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.112.
- [20] <https://www.avrasynthesis.com/#/ProdDet>. Accessed: 01.12.2023
- [21] Abubakar Kawuwa Sani, Isaac Olaniyi Olawoore, Rao Martand Singh, "Assessment of impregnating phase change materials into lightweight aggregates for development of thermal energy storage aggregate composites", *Construction and Building Materials*, Volume 305, 2021, 124683, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124683.
- [22] Hawes D, Banu D, Feldman D. "Latent heat storage in concrete. II", *Solar Energy Materials*, 1990, vol. 21, issue 1, pp. 61-80, DOI: 10.1016/0165-1633(90)90043-Z.
- [23] EN 16798-1:2019, *Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*.
- [24] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. (Dz.U. 2022.1225).