

---

# Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych

---

## STABILIZACJA TEMPERATURY W POMIESZCZENIACH Z WYKORZYSTANIEM ZASOBNIKÓW CIEPŁA/CHŁODU Z MATERIAŁEM PCM ZINTEGROWANYCH Z SYSTEMEM WENTYLACJI BUDYNKU

*Temperature stabilization in buildings by the use of heat/cold storage units  
with PCM integrated with the ventilation system*

Dr hab. inż. Maciej JAWORSKI, prof. PW  
Dr hab. inż. Artur RUSOWICZ prof. PW  
Dr inż. Andrzej GRZEBIELEC

Politechnika Warszawska  
Instytut Techniki Ciepłej  
ul. Nowowiejska 21/25,  
00-665 Warszawa

---

### Streszczenie

W pracy przedstawiono pasywną metodę mającą na celu ograniczenie zapotrzebowania na energię do celów klimatyzacji, której istotą jest zwiększenie bezwładności cieplnej struktury budynku przez zastosowanie materiałów zmiennofazowych PCM. Opisano różne metody wkomponowania materiałów PCM w różne elementy budynku. Przedstawiono również wyniki badań eksperymentalnych wybranych typów zasobników ciepła z PCM pokazujące wpływ zwiększonej bezwładności cieplnej struktury budynku na stabilizację temperatury wewnątrz pomieszczeń. W szczególności opisano badania zasobnika ciepła/chłodu zbudowanego z kompozytu gipsowego z dodatkiem PCM zintegrowanego z systemem wentylacji budynku.

**Słowa kluczowe:** materiały zmiennofazowe, wentylacja, zasobnik ciepła

---

### Abstract

The paper presents a passive method aimed at limiting the energy demand for air-conditioning purposes, the essence of which is to increase the thermal inertia of the building structure by using phase change materials, PCM. Different methods of incorporation of PCMs into various building elements are described. The results of experimental research on selected types of heat storage units with PCM showing the effect of increased thermal inertia of the structure of the building on the stabilization of indoor temperature were also presented. In particular, the research describes a heat/cold storage unit produced of a gypsum composite with the addition of PCM, integrated with the building ventilation system.

**Key words:** phase-change material, ventilation, heat storage.

---

## 1. WPROWADZENIE

Zapotrzebowanie na energię w sektorze budownictwa (obejmującym zarówno budynki komunalne, jak i użyteczności publicznej) w krajach Unii Europejskiej stanowi ok

40% całkowitego zużycia energii finalnej [1]. Dwie trzecie tego zużycia jest związane z potrzebą zapewnienia warunków komfortu cieplnego, czyli jest zużywane na ogrzewanie lub chłodzenie pomieszczeń. Szczególnie duże zużycie energii występuje w budynkach użyteczności publicznej, w których wskaźnik zużycia (w kWh/m<sup>2</sup>/a) jest od dwóch (w biurach) do prawie sześciu (w restauracjach) razy większy niż dla mieszkań w budynkach wielorodzinnych [2]. Liczby te pokazują, że szczególnie w tym sektorze istnieje bardzo duży potencjał oszczędności energii, przede wszystkim przez racjonalizację jej zużycia.

Spośród wielu czynników mających wpływ na zużycie energii w budynkach istotne znaczenie z punktu widzenia możliwości wpływu na ten wskaźnik ma ten obejmujący strukturę budynku, czyli takie elementy jak grubość ścian, ich właściwości izolacyjne, wielkość i usytuowanie okien itp. Rola izolacji przegród zewnętrznych jest bezdyskusyjna. Okazuje się, że duże znaczenie ma także bezwładność cieplna przegród, nie tylko zewnętrznych, ale także wewnętrznych, tzn. całej konstrukcji budowli. Duża pojemność cieplna elementów konstrukcyjnych budynku wpływa stabilizująco na temperaturę wewnętrzną ze względu na zwiększoną zdolność do gromadzenia ciepła (lub chłodu), a tym samym przyczynia się do ograniczenia zużycia energii przez aktywne układy klimatyzacyjne.

Współczesne technologie budowlane bazują na lekkich, ale o dużej wytrzymałości, materiałach konstrukcyjnych. Materiały izolacyjne, które mają zapewnić wymagane właściwości cieplne przegród budowlanych, mają praktycznie pomijalną pojemność cieplną (są to najczęściej izolacje włókniste lub piankowe). Bezwładność cieplna takich budowli jest więc stosunkowo niewielka, co sprawia, że warunki cieplne w ich wnętrzach są bardzo podatne na zmiany warunków otoczenia (temperatury, szybkości wiatru, nasłonecznienia), jak również na zmiany wewnętrznych źródeł ciepła. Utrzymanie temperatury wewnętrznej na odpowiednim poziomie wymaga stosunkowo dużego zużycia energii, mimo dobrej izolacyjności przegród. W ostatnich latach w budownictwie obserwuje się zwiększone zainteresowanie technologiami, pozwalającymi na tworzenie takich struktur budynków, które byłyby lekkie, o dobrej izolacji termicznej i jednocześnie o dużym potencjale do gromadzenia ciepła (chłodu), czyli o dużej pojemności cieplnej. Cel ten można osiągnąć przez wykorzystanie bezpośrednio w produkcji elementów budowlanych, a także wkomponowanie w różny sposób w strukturę budynków, materiałów zmiennofazowych (ang. *phase change materials*, PCM). Materiały te charakteryzują się dużą pojemnością cieplną w zakresie temperatury pracy (w przypadku zastosowań w budownictwie odpowiada to zakresowi temperatury komfortu cieplnego lub zakresowi temperatury czynników w ogrzewaniu podłogowym) i wynika ona z faktu, że w tym zakresie materiał ulega przemianie fazowej topnienie-zestalenie. Podstawowe charakterystyki tego typu materiałów w kontekście zastosowań w budownictwie, metody wytwarzania elementów budowlanych impregnowanych PCM oraz sposoby wkomponowania tych materiałów w struktury budynków można znaleźć w wielu publikacjach przeglądowych [3-6].

Zastosowanie materiałów zmiennofazowych (PCM) w budownictwie jest szczególnie efektywne jako uzupełnienie techniki *free cooling* (ang. *night ventilation cooling*). Jest to technika, która przy niewielkim zużyciu energii pozwala osiągnąć wymagane parametry komfortu cieplnego, przez wykorzystanie chłodnego powietrza z otoczenia (w porze nocnej) jako źródła chłodu [7-14]. Budynek biurowy nagrzewa się w ciągu dnia w wyniku oddziaływań zewnętrznych (wysoka temperatura, nasłonecznienie) ale także ze względu na istnienie dużych wewnętrznych źródeł ciepła – wyposażenie elektryczne, pracownicy, itp. W porze nocnej budynek jest schładzany przez jego intensywną wentylację. Zakres oscylacji temperatury w cyklu dobowym zależy od

wielkości źródeł ciepła w ciągu dnia, temperatury powietrza w nocy i intensywności wentylacji, a także od bezwładności cieplnej samej struktury budynku. Jeżeli pojemność cieplna (która jest miarą zdolności do gromadzenia ciepła) jest duża, to oscylacje temperatury będą mniejsze, co przejawia się przede wszystkim obniżeniem maksymalnej temperatury w pomieszczeniach w ciągu dnia. Dużą pojemność cieplną budynku można osiągnąć, bez istotnego zwiększenia jego masy, używając materiałów PCM.

O efektywności techniki free coolingu z zastosowaniem materiałów zmienno-fazowych decyduje nie tylko ilość materiału PCM wkomponowanego w budynek, ale także intensywność nocnej wentylacji (wydatek przepływającego powietrza) oraz powierzchnia wymiany ciepła między chłodnym powietrzem a elementami budowlanymi zawierającymi materiał PCM. Najprostsza i najczęściej stosowana metoda wkomponowania PCM w strukturę budynku polega na jego dodaniu do wewnętrznych elewacji – płyt gipsowo-kartonowych lub zaprawy gipsowej. Wadą tego rozwiązania jest stosunkowo mała powierzchnia wymiany ciepła z otaczającym powietrzem, jak również niska intensywność wymiany ciepła (tylko na drodze konwekcji naturalnej). Skutkuje to małym stopniem wykorzystania materiału PCM – przemianie fazowej ulega tylko materiał znajdujący się w cienkiej przypowierzchniowej warstwie elewacji. Dlatego stale poszukuje się nowych sposobów wkomponowania materiałów zmienno-fazowych w elementy budynku, w tym w elementy systemów wentylacyjnych, jak również intensyfikacji transportu ciepła do materiału PCM znajdującego się w strukturze budynku. .

Wykorzystanie materiałów PCM w budownictwie jest przedmiotem dużego zainteresowania wielu ośrodków naukowo-badawczych. Problemem, na który zwraca się szczególnie wiele uwagi, jest dobór struktury zasobnika ciepła i jego usytuowanie w systemie wentylacji (lub ogólnie w ciągu przepływu powietrza) zapewniające dużą intensywność wymiany ciepła. Większość propozycji jest adresowanych do budynków biurowych i budynków użyteczności publicznej, ze względu na duże możliwości zastosowań różnorodnych konstrukcji zasobników ciepła. W tego typu budynkach dość powszechnie jest wykonywanie sufitów podwieszanych, a tym samym tworzenie względnie dużej przestrzeni, w której można umieścić zasobniki ciepła. Wykonuje się je z materiałów kompozytowych zawierających PCM lub płaskich metalowych płyt wypełnionych tym materiałem – takie zasobniki umieszcza się nad lub pod panelami sufitu [8, 9]. Duża efektywność tego rozwiązań wynika z dużej powierzchni wymiany ciepła. Wspomniane wcześniej płyty gipsowo-kartonowe, ze względu na pogarszanie właściwości mechanicznych, zawierają niewielką ilość materiału PCM – do ok. 25%. Dodatkowo mają one niską efektywną przewodność cieplną, co utrudnia zarówno gromadzenie jak i oddawania ciepła. Proponuje się wykonywanie elewacji wewnętrznych z innego typu kompozytu z PCM – wykonanego z osnowy włóknistej o dużej porowatości, który może zawierać nawet do 80% PCM, zachowując przy tym kształt również po jego stopieniu (ang. *shape stabilized PCM*) [10]. Fraisse i in. [11] badali podwójną ścianę zawierającą materiał zmienno-fazowy, której wewnętrzna szczelina była kanałem wentylacyjnym. Przedmiotem badań opisanych w [12] był złożony, aktywny system cieplny budynku (ang. *thermally activated building system*). Zasobnikami ciepła w tym układzie były płyty stropowe, których puste przestrzenie wypełniono materiałem PCM, a także wkomponowano wymienniki ciepła zapewniające kontrolę procesu ładowania i rozładowania. Efektywność cieplna elementów budynku będących zasobnikami ciepła zależy od wielu czynników, m.in. rozmieszczenia materiału PCM w przestrzeni elementu, jego właściwości termofizycznych (m.in. temperatury przemiany fazowej), a także od orientacji przestrzennej samego elementu budynku. Szczegółowe badania dotyczące ww. zagadnień można znaleźć w pracach [15, 16]

Opisane wyżej przykładowe techniki wykorzystują elementy konstrukcyjne budynku (ściany, sufity, stropy) jako zasobniki ciepła. Inne podejście polega na zaprojektowaniu specjalnych zasobników ciepła, które umieszczane są w ciągach wentylacyjnych. Tego typu zasobniki nie mogą być tak duże jak elementy budynku, jednakże względny udział PCM może być znacznie większy, także ich kształt może być optymalizowany ze względu na intensywność wymiany ciepła. W literaturze można spotkać wiele propozycji tego typu zasobników różniących się konfiguracją geometryczną. W pracach [17-19], stosując różne metody badawcze – eksperymentalne i symulacje komputerowe – badano zasobniki ciepła zestawione z cienkich płyt aluminiowych wypełnionych materiałem PCM, analizując nie tylko konfigurację geometryczną zasobników ale także różne konfiguracje materiałów PCM – o różnych temperaturach przemiany. Nietypowy zasobnik ciepła został zaproponowany przez Raja i in. [20]. Materiał PCM znajdował się w dyskach z wieloma otworami. Po zestawieniu tych dysków w stosy otwory tworzyły kanały dla przepływu powietrza. Jako zasobnik ciepła można potraktować także wentylowaną fasadę budynku, której charakterystyki cieplne przedstawiono w pracy [21]. Obszerny przegląd różnych konfiguracji zasobników ciepła z materiałami zmiennofazowymi do zastosowań w budownictwie można znaleźć w pracy Rodrigueza i in. [22].

## **2. BADANIA CHARAKTERYSTYK CIEPLNYCH PŁYT GIPSOWYCH Z MATERIAŁEM PCM**

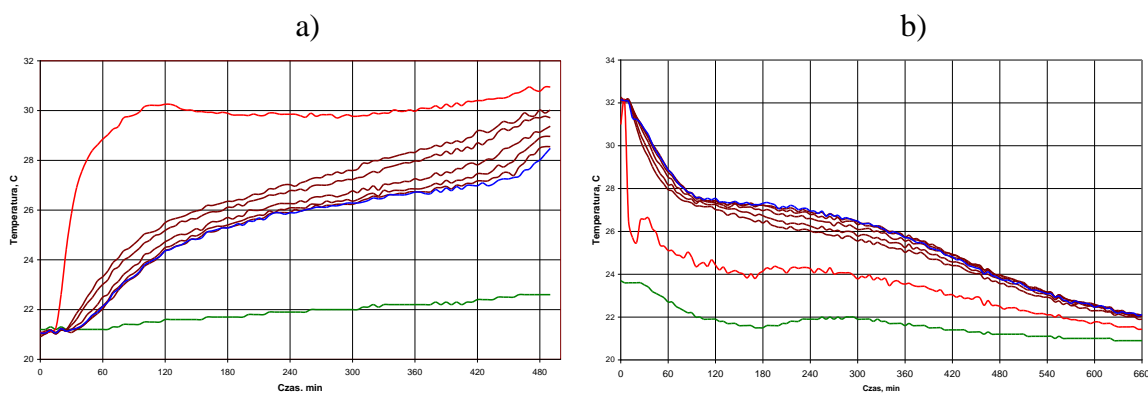
Najprostszą metodą wkomponowania materiałów PCM z strukturę budynku jest ich użycie w elewacjach wewnętrznych w formie albo zapraw gipsowych z dodatkiem PCM, albo w formie płyt gipsowych z PCM. Nie jest to sposób gwarantujący dużą efektywność akumulacji ciepła/chłodu ale efekt jest widoczny nawet w prostych eksperymentach. Przykładem są badania charakterystyk cieplnych grubej płyty (o wymiarach 250×250 mm i grubości 34 mm) wykonanej z kompozytu gipsowego z dodatkiem mikrokapsułkowanego materiału PCM (Micronal 5001X firmy BASF, udział PCM 18,4%, temperatura topnienia 26°C, ciepło topnienia ok. 110 kJ/kg).

W płycie umieszczono 7 termoelementów (typu K, w osłonie z teflonu, o średnicy ok. 0,6 mm). Dwa termoelementy znajdowały się na powierzchniach płyty, natomiast pozostałe 5 umieszczono na cienkich drutach (0,2 mm) rozpiętych między ściankami ramki, w której wylewano próbkę). Czujniki tych termoelementów znajdowały się na różnych poziomach próbki, co ok. 5 mm licząc od powierzchni dolnej. Taki układ termoelementów pozwalał na pomiar rozkładu temperatury w próbce.

Na rysunku 1a) pokazano zmiany temperatury w różnych miejscach płyty w czasie jej wygrzewania. Na początku płyta miała temperaturę (jednorodną) 21°C. Symulowano temperaturę otoczenia równą 32°C (temperatura chłodnicy umieszczonej nad płytą, która była zasilana z termostatu). Linia czerwona pokazuje zmiany temperatury na powierzchni górnej płyty, linia niebieska – zmiany temperatury dolnej powierzchni, a linia zielona – temperatura otoczenia. Linie brązowe to wskazania termoelementów zalanych w gipsie w odstępach co ok. 5 mm. Na rys. 1.b) pokazano analogiczną charakterystykę w czasie chłodzenia. Temperatura początkowa płyty wynosiła 32°C, natomiast temperatura otoczenia zmieniała się w czasie pomiaru od ok. 23,7 do ok. 20,8°C (cały pomiar trwał 11 godzin).

Na obu wykresach widać wyraźne obniżenie tempa zmian temperatury wywołane przemianą fazową materiału PCM. Izotermiczny proces przemiany fazowej spowodował nie tylko spłaszczenie krzywych temperatury wewnątrz próbki, ale także na jej

powierzchni (linie czerwone na obu rysunkach). Wskazuje to na zdolność materiału zmiennofazowego znajdującego się w ścianach pomieszczenia do stabilizacji temperatury w jego wnętrzu.

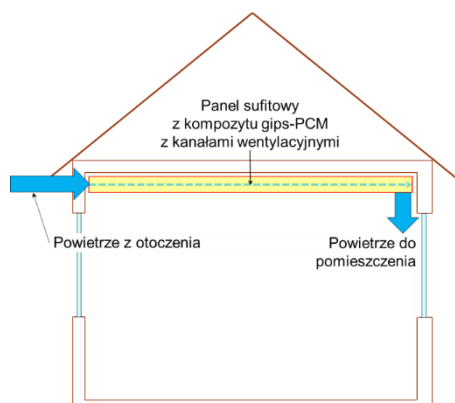


**Rys. 1.** a) Ogrzewanie płyty – symulacja ogrzewania górnej powierzchni płyty w powietrzu o temperaturze 32°C; b) chłodzenie płyty w warunkach konwekcji naturalnej

### 3. BADANIE ZASOBNIKA Z MATERIAŁEM PCM ZINTEGROWANEGO Z SYSTEMEM WENTYLACJI BUDYNKU

Badanym zasobnikiem ciepła jest panel (płyta) sufitowy, wykonany z kompozytu zaprawa gipsowa – materiał zmiennofazowy. W płycie tej znajdują się kanały biegnące przez całą jej długość, które są połączone w ciągi wentylacyjne – w ten sposób zasobnik ciepła/chłodu jest włączony w system wentylacji budynku. Koncepcja zakłada wykorzystanie tego układu głównie w okresie letnim do wstępnego schłodzenia/nagrzania powietrza pobieranego z otoczenia w celu wentylacji pomieszczeń. W umiarkowanej strefie klimatycznej w okresie letnim temperatury powietrza w ciągu dnia przekraczają często 30°C, podczas gdy w nocy spadają poniżej 15°C [23]. Stosując wymiennik regeneracyjny w układzie wentylacji można spłaszczyć krzywą oscylacji temperatury powietrza do zakresu odpowiadającego warunkom komfortu cieplnego. W proponowanym rozwiązaniu sufit pomieszczenia jest wymiennikiem regeneracyjnym. Ciepłe powietrze zasysane w ciągu dnia przepływa przez kanały w płycie sufitowej oddając ciepło przede wszystkim do materiału PCM, który jest jej istotnym składnikiem. Temperatura przemiany fazowej materiału PCM jest dobrana odpowiednio do wymagań komfortu cieplnego, jak również do zakresu zmian temperatury w otoczeniu. W przypadku omawianym w tej pracy temperatura ta wynosi ok. 23°C i jest w przybliżeniu w połowie zakresu dobowej oscylacji temperatury otoczenia. Materiał zmiennofazowy gromadzi ciepło w przemianie fazowej (topnienia), tym samym schładza powietrze do temperatury nieco wyższej niż temperatura topnienia. W nocy chłodne powietrze przepływa przez te same kanały w nagrzanym panelu sufitowym (ze stopionym materiałem PCM). W tej fazie cyklu powietrze ogrzewa się do temperatury nieco niższej niż temperatura topnienia PCM, a materiał ten ulega zestaleniu i jest gotowy do absorpcji ciepła w kolejnym cyklu. Schematycznie zasadę funkcjonowania panelu sufitowego – zasobnika ciepła pokazano na rys. 2. W stosunku do typowych rozwiązań elementów budynku będących zasobnikami ciepła (ściana, sufit, elementy sufitu podwieszanego) proponowane rozwiązanie ma istotne zalety, a mianowicie znacznie większą powierzchnię wymiany ciepła i większe współczynniki przejmowania ciepła ze względu na konwekcję wymuszoną.

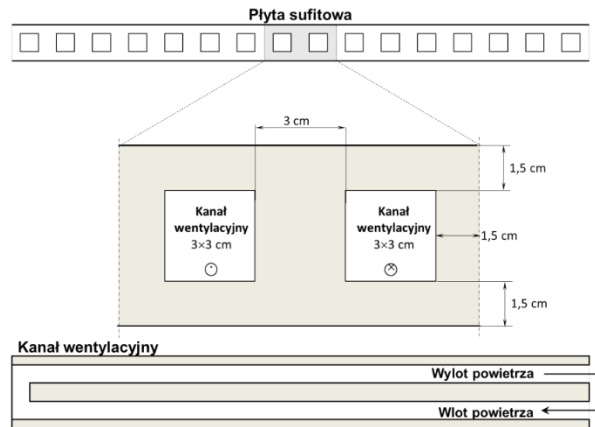
Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie eksperymentalne charakterystyk cieplnych panelu sufitowego – zasobnika ciepła. W tym celu zbudowano model panelu obejmujący jeden cały kanał wentylacyjny, model ten był powtarzalnym elementem płyty sufitowej. Stanowisko laboratoryjne zostało wykonane w skali zbliżonej do rzeczywistej. Badania przeprowadzono zarówno przy uproszczonych warunkach brzegowych (oscylacje temperatury w cyklu dobowym), jak również w warunkach zbliżonych do rzeczywisty, kiedy powietrze było pobierane z otoczenia budynku laboratorium.



**Rys. 2.** Zasada działania zasobnika ciepła w postaci panelu sufitowego z kanałami wentylacyjnymi

#### **4. OPIS STANOWISKA EKSPERYMENTALNEGO**

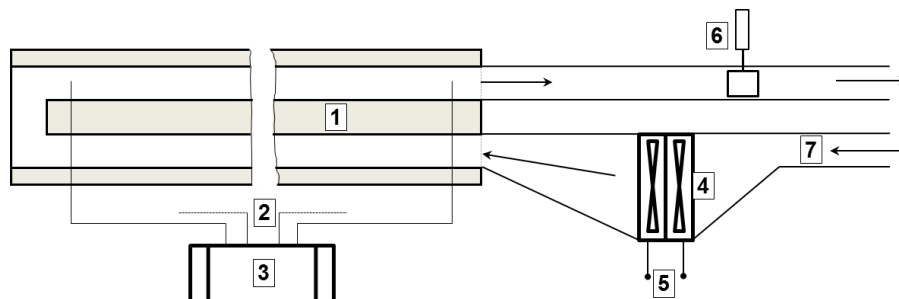
Założono, że kanały wentylacyjne są równomiernie rozmieszczone w płycie sufitowej oraz, że jeden ciąg dla przepływu powietrza składa się z dwóch kanałów, tzn. że wlot i wylot powietrza znajdują się po tej samej stronie płyty. Dzięki temu długość drogi przepływu powietrza, a tym samym powierzchnia wymiany ciepła, jest większa. Powtarzalny element płyty sufitowej składa się z dwóch kanałów, tak jak to pokazano na rys. 3. Wymiary układu podane na tym rysunku określono na podstawie założeń dotyczących szybkości przepływu powietrza w kanale (która jest związana z krotności wymiany powietrza) oraz biorąc pod uwagę możliwość wykonania panelu ze standardowych płyt gipsowo-kartonowych zawierających PCM – grubość ścianek 15 mm. Płyta, będąca podstawową częścią stanowiska badawczego, miała 6 cm grubości, 12 cm szerokości i 3 m długości. Została ona umieszczona na warstwie styropianu o grubości 5 cm, także jej boczne powierzchnie zostały zaizolowane tej samej grubości warstwą styropianu. Ograniczono w ten sposób wymianę ciepła z otoczeniem tylko do jednej powierzchni zewnętrznej – górnej, nieosłoniętej powierzchni płyty w stanowisku doświadczalnym odpowiadała dolnej powierzchni sufitu. Odwrócenie układu było podyktowane względami praktycznymi i nie miało istotnego wpływu na wynik badań, ponieważ dominująca wymiana ciepła między zasobnikiem a strumieniem powietrza ma miejsce na wewnętrznych powierzchniach kanału.



**Rys. 3.** Schemat stanowiska badawczego – powtarzalnego elementu płyty sufitowej z kanałami wentylacyjnymi

Płyta została wykonana z kompozytu na bazie zaprawy gipsowej (Knauf) z dodatkiem materiału PCM – Micronal DS-5008X, produkcji BASF. Zawartość PCM wynosi ok 27,6% (30% suchych składników). Przy takim, stosunkowo niskim udziale w PCM w materiale, zachowane są jego odpowiednie właściwości wytrzymałościowe, spełnione są również wymagania dot. bezpieczeństwa ppoż. Właściwości termofizyczne kompozytu zostały one określone przy użyciu kalorymetru skaningowego DSC [24]. Temperatura przemiany fazowej PCM wynosi ok. 22,8°C, ciepło topnienia ok. 103 kJ/kg, ciepło właściwe fazy stałej i ciekłej odpowiednio 2,42 oraz 2,30 kJ/(kg·K). Średnia wartość przewodności cieplnej w zakresie temperatury 15-30°C wynosi 0,17 W/(m·K) [25].

W kanale pomiarowym zainstalowano kilkadziesiąt czujników temperatury (termoelementy typu K o średnicy ok. 0,5 mm w osłonie teflonowej), które pozwalały na pomiar temperatury powietrza wzdłuż kanału, temperatury wewnętrznej powierzchni kanału, a także temperatury na zewnętrznej powierzchni kanału. W celu ustalania temperatury powietrza na wlocie do kanału w układzie zainstalowano wymiennik ciepła ciec-z powietrze zasilany z termostatu. Przepływ powietrza był kontrolowany przy użyciu dwóch wentylatorów zasilanych prądem stałym z zasilacza o regulowanym napięciu. Używając anemometru wyznaczono zależność wydatku przepływu powietrza od napięcia zasilania wentylatorów. Układ pozwalał na regulację prędkości przepływu powietrza (w kanale) w zakresie od 0,5 do 3 m/s. Schemat stanowiska eksperymentalnego pokazano na rys. 4.

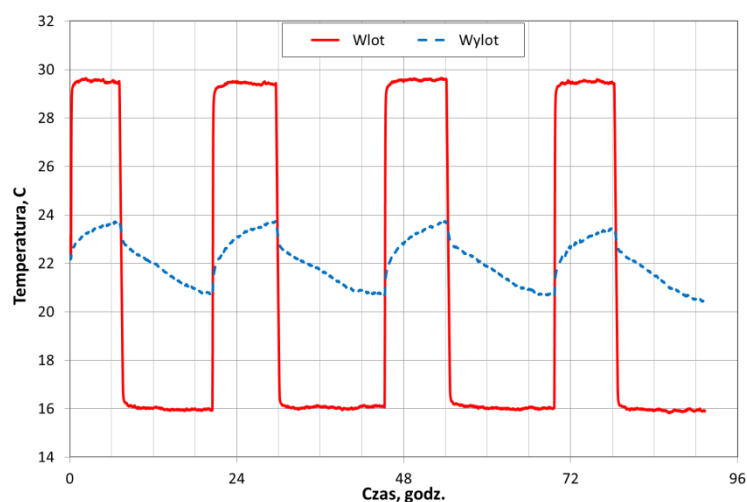


**Rys. 4.** Schemat stanowiska badawczego w układzie otwartym; 1 – kanał wentylacyjny/zasobnik ciepła, 2 – termoelementy, 3 – układ akwizycji danych, 4 – wentylatory, 5 – zasilacz regulowany wentylatorów, 6 – przepływomierz, 7 – wlot powietrza z otoczenia

W celu wyznaczenia charakterystyk cieplnych badanego zasobnika przeprowadzono wiele cykli pomiarowych realizowanych w różnych warunkach. Część pomiarów zrealizowano w warunkach w laboartoryjnych, z pełną kontrolą temperatury powietrza na wlocie do kanału (między wentylatorami a wlotem do kanału umieszczony był wymiennik ciepła zasilany z termostatu). Badania te miały na celu przede wszystkim ocenę intensywności procesów transportu ciepła w zasobniku, w tym procesu topnienia i zestalania materiału zmiennofazowego. Wykonano także badania w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, kiedy powietrze było pobierane z zewnątrz budynku laboratorium. W tej fazie badań wyznaczano całościową charakterystykę zasobnika, czyli jego zdolność do tłumienia dobowych oscylacji temperatury powietrza pobieranego w celu wentylacji budynku.

## 5. WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 5 przedstawiono zmiany temperatury powietrza na wlocie i wylocie z kanału w ciągu 4 dni rejestracji przy szybkości przepływu powietrza równej 2 m/s oraz przy prostokątnej charakterystyce zmian temperatury na wlocie. Widać znaczące tłumienie oscylacji temperatury powietrza po przepłynięciu przez zasobnik ciepła. Temperatura powietrza dopływającego do pomieszczenia w cyklu dobowym oscyluje w zakresie ok. 3,2°C, podczas gdy w otoczeniu (na wlocie do kanału) oscylacje te są w zakresie ok. 13,6°C (taki zakres zmian temperatury w ciągu doby jest typowy dla pory letniej w strefie klimatycznej Polski Centralnej [23]). Badania wykonywano także przy innych wydatkach przepływającego powietrza obserwując zbliżone efekty [26].

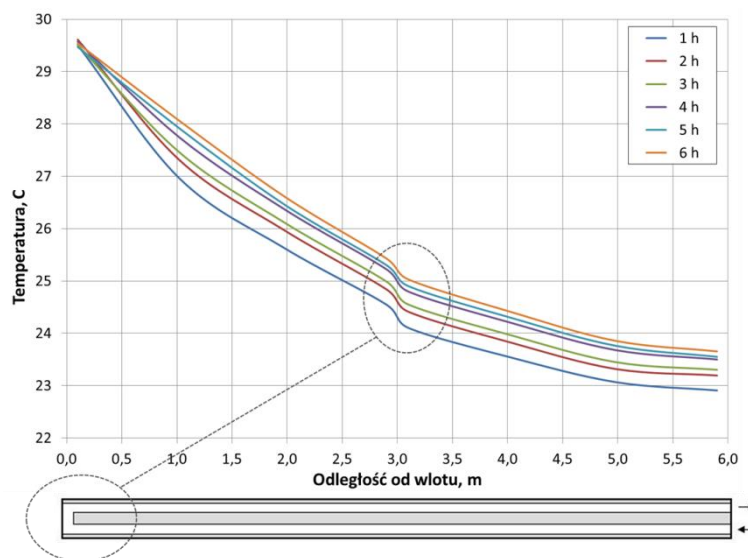


**Rys. 5.** Zmiany temperatury powietrza na wlocie i wylocie z kanału przy szybkości przepływu powietrza 2 m/s

Na rysunku 6 pokazano zmiany temperatury powietrza wzdłuż kanału w czasie ogrzewania przy szybkości 2 m/s. Temperatura powietrza na wlocie do kanału wynosi ok. 29,5°C, zasobnik ciepła jest w tej fazie „ładowany”. Załamanie krzywych temperatury powietrza w miejscu gdzie kanał zawraca pokazuje jak znacząco rośnie intensywność przyjmowania ciepła w tym obszarze, co jest związane z silną turbulizacją przepływu. Analiza ilościowa zmian temperatury powietrza pozwala ocenić intensywność procesów ładowania i rozładowania zasobnika, jak również ilość zgromadzonego ciepła w czasie jednego cyklu. Intensywność przekazywania ciepła przy szybkości strumienia powietrza 2 m/s zmieniała się w zakresie od ok 44 do ok 35 W/m<sup>2</sup> (w czasie 8 godzin „ładowania”), a

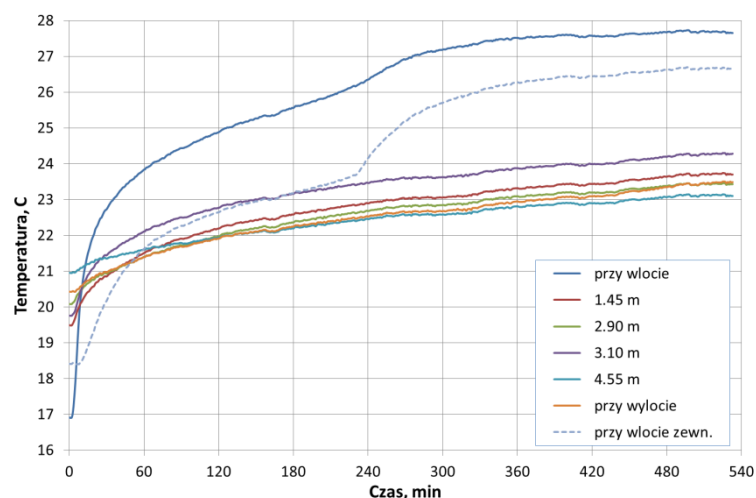


łączna ilość zmagazynowanego ciepła wyniosła ok. 1,2 MJ/m<sup>2</sup> [26] (obie wielkości odniesione do jednostkowej powierzchni panelu sufitowego).



**Rys. 6.** Rozkład temperatury powietrza wzdłuż kanału w czasie ogrzewania

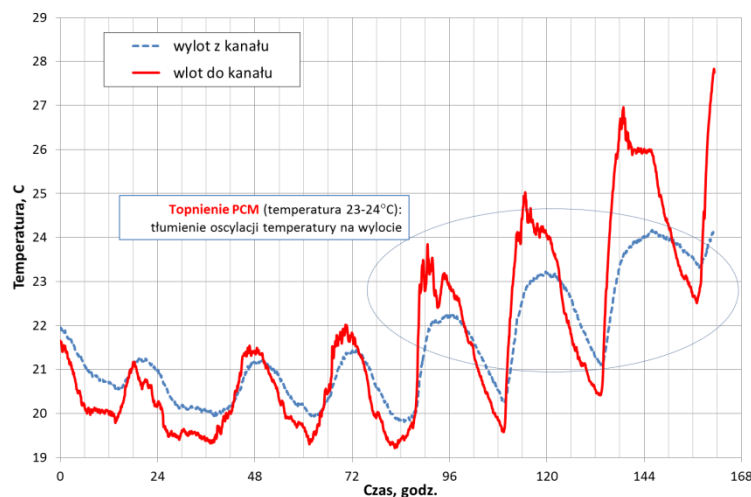
Na rysunku 7 pokazano zmiany temperatury na wewnętrznej powierzchni kanału w różnych odległościach od wlotu w czasie ogrzewania w trzecim cyklu. Pokazano również temperaturę na powierzchni zewnętrznej przy wlocie do kanału. Z kształtu krzywych zmian temperatury w różnych punktach można ocenić stopień wykorzystania potencjału materiału zmiennofazowego do akumulacji ciepła, tzn. jaka część tego materiału, będąca częścią kompozytu, ulega przemianom fazowym. Wyniki pomiarów pokazują, że w badanym zasobniku całkowicie uległ stopieniu materiał PCM znajdujący się blisko części wlotowej kanału. W pozostałej części segmentu materiał ten „pracuje” tylko częściowo. Wynika stąd wniosek, że ścianki kanału są zbyt grube, lub też, że należy inaczej rozmieścić materiał PCM w ściankach, tzn. głównie przy wewnętrznych powierzchniach.



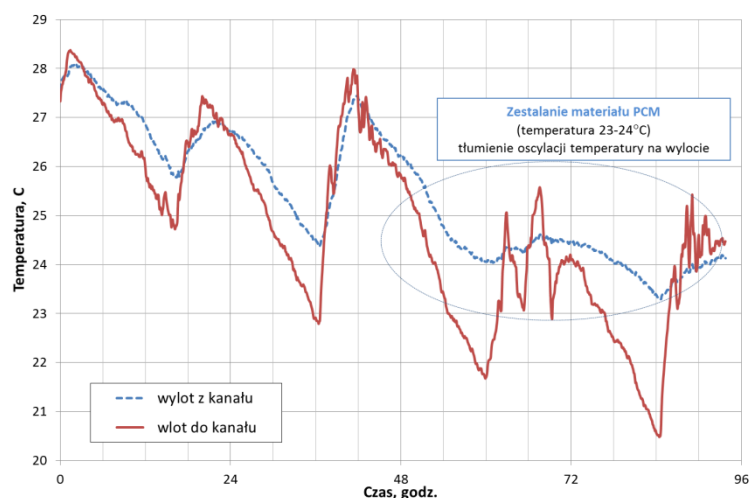
**Rys. 7.** Zmiany temperatury na wewnętrznej powierzchni kanału w czasie ogrzewania

Na kolejnych dwóch rysunkach przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Badania wykonywano w okresie letnim (lipiec-

sierpień) również w cyklach wielodniowych (od 5 do 8). Przez pewne nieprzewidziane zaburzenia w otoczeniu kolektora dolotowego nie udało się odtworzyć rzeczywistych charakterystyk zmian temperatury otoczenia, tzn. wahania temperatury na wlocie do kanału były znacznie mniejsze niż rzeczywiste. Ponieważ jednak w dłuższym okresie (tydzień) średnia temperatura otoczenia zmieniała się w sposób istotny, udało się zaobserwować wpływ materiału PCM na charakterystykę badanego zasobnika.



**Rys. 8.** Oscylacje temperatury na wlocie i wylocie z kanału w warunkach zbliżonych do rzeczywistych – okres wzrostu średniej temperatury powietrza



**Rys. 9.** Oscylacje temperatury na wlocie i wylocie z kanału w warunkach zbliżonych do rzeczywistych – okres spadku średniej temperatury powietrza

Na rysunku 8 pokazano zmiany temperatury powietrza na wlocie do kanału oraz na wylocie w ciągu tygodniowego testu. W ciągu pierwszych trzech dni temperatura otoczenia była w miarę stabilna, a jej średnia dobowa poniżej temperatury przemiany fazowej materiału PCM. Ponieważ w tych warunkach materiał zmiennofazowy nie miał możliwości ulegać przemianom fazowym (topnieniu i zestalaniu) jego wpływ na charakterystykę tłumienia oscylacji temperatury powietrza był znikomy. Zmiana nastąpiła w kolejnych dniach, kiedy średnia temperatura powietrza zaczęła rosnąć i osiągnęła poziom przekraczający temperaturę topnienia PCM (ok. 23°C). W ciągu trzech dni temperatura powietrza w ciągu doby zmieniała się w dość dużym zakresie wokół

temperatury topnienia PCM. Materiał ten (częściowo) ulegał topnieniu i zestalaniu w cyklu dobowym, co uwidoczniło się w wyraźnym tłumieniu oscylacji temperatury na wylocie z zasobnika. Podobne zachowanie układu widać na rysunku 9, na którym pokazano wyniki rejestracji temperatury w czasie testu, podczas którego średnia temperatura powietrza stopniowo malała z poziomu powyżej temperatury topnienia PCM do wartości poniżej tej temperatury.

## 6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, których celem było określenie charakterystyk cieplnych specjalnego zasobnika ciepła będącego częścią systemu wentylacji budynku. Materiałem akumulującym ciepło jest kompozyt wytworzony z zaprawy gipsowej z dodatkiem materiału zmiennofazowego o dużej pojemności cieplnej. Koncepcja przedstawiona w pracy zakłada, że z takiego kompozytu wykonana zostanie płyta sufitowa z kanałami wentylacyjnymi.

Badania potwierdziły efektywność proponowanego rozwiązania jako wymiennika regeneracyjnego. Uzyskano również szczegółowe informacje dotyczące intensywności procesów przejmowania ciepła w fazie ładowania i rozładowania zasobnika. Pozwolą one na optymalizację zasobników ciepła zintegrowanych ze strukturą budynku takich, jaki przedstawiono w pracy, ale także zasobników o innych strukturach wykonanych z materiałów budowlanych z dodatkiem PCM. Czynnikiem, na który należy zwrócić szczególną uwagę przy projektowaniu podobnych zasobników ciepła są ich wymiary (w tym przypadku grubość ścianek kanału), ale także sposób dystrybucji materiału zmiennofazowego w kompozycie.

## LITERATURA

- 1) Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout Ch.: A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings*, 40 (2008) 394-398.
- 2) Sadowska B.: Efektywność wznoszenia budynków w standardach NF40 i NF15, *Modern Engineering 1* (2017)
- 3) Soares N., Costa J.J., Gaspar A.R., Santos P.: Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, *Energy and Buildings* 59 (2013) 82-103.
- 4) Tung-Chai L., Chi-Sun Poon: Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete, *Construction and Building Materials* 46 (2013) 55-62
- 5) Kuznik F., David D., Johannes K., Roux J.-J.: A review on phase change materials integrated in building walls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 379-391.
- 6) Tatsidjoudoung P., Le Pierres N., Luo L.: A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18 (2013) 327-349.
- 7) Waqas A., Zia Ud Din: Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18 (2013) 607-625
- 8) Yanbing K., Yi J., Yinping Z.: Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system – NVP system, *Energy and Buildings* 35 (2003) 417-425.
- 9) Susman G., Dehouche Z., Cheechern T., Craig S.: Tests of prototype PCM 'sails' for office cooling, *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 717-726.

- 10) Zhou G., Yang Y., Xu H.: Energy performance of a hybrid space-cooling system in an office building using SSPCM thermal storage and night ventilation, *Solar Energy* 85 (2011) 477-485.
- 11) Fraisse G., Boichot R., Kouyoumji J.-L., Souyri B.: Night cooling with a ventilated internal double wall, *Energy and Buildings* 42 (2010) 393-400.
- 12) Pomianowski M., Heiselberg P., Jensen R.L.: Dynamic heat storage and cooling capacity of a concrete deck with PCM and thermally activated building system, *Energy and Buildings*, 53 (2012) 96-107.
- 13) Álvarez S., Cabeza L.F., Ruiz-Pardo A., Castell A., Tenorio J.A.: Building integration of PCM for natural cooling of buildings, *Applied Energy* 109 (2013) 514–522
- 14) Zhai X.Q., Wang X.L., Wang T., Wang R.Z.: A review on phase change cold storage in air-conditioning system: Materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (2013) 108–120.
- 15) Evola G., Marletta L., Sicurella F.: A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings, *Building and Environment* 59 (2013) 517-27.
- 16) Izquierdo-Barrientos M.A., Belmonte J.F., Rodríguez-Sánchez D., Molina A.E., Almendros-Ibáñez J.A.: A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM), *Applied Thermal Engineering* 47 (2012) 73-85.
- 17) Dolado P., Lazaro A., Marin J.M., Zalba B.: Characterization of melting and solidification in a real scale PCM-air heat exchanger: Numerical model and experimental validation, *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 1890-1907.
- 18) Tyagi V.V., Buddhi D., Kothari R., Tyagi S.K.: Phase change material (PCM) based thermal management system for cool energy storage application in building: An experimental study, *Energy and Buildings* 51 (2012) 248-254.
- 19) Mosaffa A.H., Infante Ferreira C.A., Rosen M.A., Talati F.: Thermal performance optimization of free cooling systems using enhanced latent heat thermal storage unit, *Applied Thermal Engineering* 59 (2013) 473-479.
- 20) Raj V.A.A., Velraj R.: Heat transfer and pressure drop studies on a PCM-heat exchanger module for free cooling applications, *Int. Journal of Thermal Sciences* 50 (2011) 1573-1582.
- 21) de Gracia A., Navarro L., Castell A., Cabeza L.: Numerical study on the thermal performance of a ventilated facade with PCM, *Applied Thermal Engineering* 61 (2013) 372-380
- 22) Rodriguez E., Ruiz-Valero L., Vega S., Neila J.: Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses, *Energy and Buildings* 50 (2012) 49-62.
- 23) [www.http://mib.gov.pl](http://mib.gov.pl)
- 24) Jaworski M., Łapka P., Furmański P.: Numerical modelling and experimental studies of thermal behavior of building integrated thermal energy storage unit in a form of a ceiling panel, *Applied Energy* 113 (2014) 548-557
- 25) Jaworski M., Abeid S.: Thermal conductivity of gypsum containing phase change material (PCM) for building applications, *J. Power Technologies* 91 (2011) 49-53.
- 26) Jaworski M.: Thermal performance of building element containing phase change material (PCM) integrated with ventilation system – an experimental study, *Applied Thermal Engineering*, 70 (2014) 665-674