

Wpływ materiału zmiennego fazowo na właściwości wytrzymałościowe i cieplne zapraw budowlanych

Dr hab. inż. Teresa Rucińska – promotor, mgr inż. Magdalena Adamczuk, mgr inż. Błażej Ciesiński, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, ZUT w Szczecinie

1. Wprowadzenie

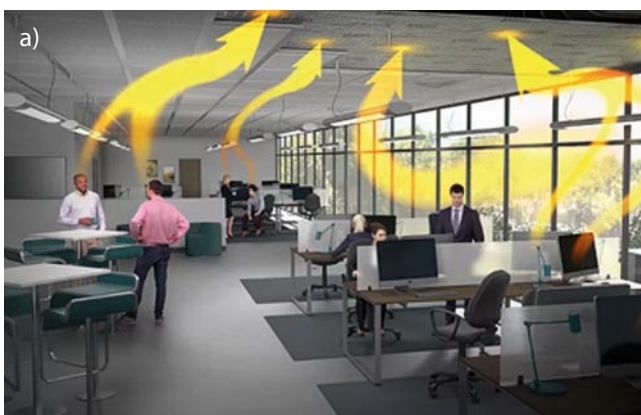
Postęp cywilizacyjny, oprócz pozytywnych efektów w różnych dziedzinach życia, przyczynił się także do ogromnej degradacji środowiska naturalnego. W trosce o przyszłość kolejnych pokoleń zrodziła się idea zrównoważonego rozwoju, w której szczególne miejsce zajmuje budownictwo. Jednym z istotnych aspektów zrównoważonego budownictwa jest zwrócenie uwagi na energochłonność procesów budowlanych, ilość powstających przy tym odpadów, obciążenie środowiskowe w czasie eksploatacji obiektów, stosowanie materiałów wolnych od negatywnego wpływu na zdrowie człowieka, a także o długim „cyklu życia” etc. W związku z tym powstało, i nadal powstaje, wiele projektów realizacji inżynierskich, które wykorzystują innowacyjne rozwiązania, także materiałowe. Do tych rozwiązań można zaliczyć wyroby powstałe na bazie materiałów zmiennych fazowo (z angielskiego PCM – *Phase Change Material*) [1], które charakteryzują się dużym ciepłem utajonym, co umożliwia zwiększenie pojemności cieplnej materiału budowlanego bez ingerencji w jego gabaryty [2]. Zdolność do magazynowania ciepła pochodzącego z otoczenia w okresie występowania wyższych temperatur (rys. 1a) i oddawania energii w okresie spadku temperatury, co ma miejsce np. nocą, pozwala na poprawę komfortu cieplnego pomieszczeń (rys. 1b) [3].

Cykle przemiany fazowej są powtarzalne i nie wpływają negatywnie na parametry techniczne i użytkowe materiałów

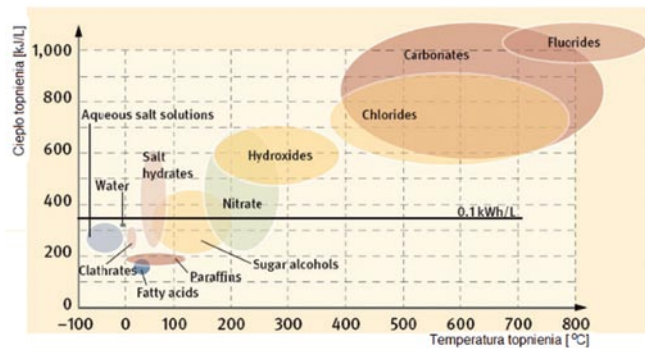
w powiązaniu z systemem wentylacji z odzyskiem ciepła. Warto więc propagować to innowacyjne rozwiązanie materiałowe, które nadal w Polsce nie jest dostatecznie rozpoznane, mimo że doskonale wpisuje się w trend budownictwa energooszczędnego, które staje się standardem, a także budownictwa pasywnego.

Dobrym przykładem wykorzystania materiałów PCM są pomieszczenia, w których pracuje duża liczba urządzeń biurowych, w tym komputerów pełniących funkcję serwerów emitujących dużą ilość ciepła (temperatura w serwerowni może przekroczyć nawet 40°C). Zapewnienie ciągłości pracy tych urządzeń jest ściśle powiązane z optymalną wilgotnością względną otoczenia na poziomie 45–55% i preferowanym zakresem temperatury 20–27°C. W związku z tym wymagają one instalowania wydajnych systemów klimatyzacyjnych, co jest związane z wysokim kosztem ich utrzymania. Wykorzystanie materiałów zmiennych fazowo, np. w wyrobach tynkarskich, wylewkach posadzkowych, płytach gipsowo-kartonowych, a także w postaci zasobników wypełnionych PCM, które można ułożyć od wewnętrznej strony na płytach sufitów podwieszanych, w drażeniach pustaków ściennych itp., w znaczący sposób mogą wpłynąć na obniżenie temperatury pomieszczeń, a tym samym kosztów eksploatacyjnych.

Materiały zmienne fazowo, również nazywane związkami zmiennofazowymi lub materiałami przemiany fazowej charakteryzuje pochłanianie, magazynowanie i uwalnianie



Rys. 1. Aktywne pochłanianie i uwalnianie ciepła dzięki zastosowaniu ENRG Blanket™ od wewnętrznej strony sufitu podwieszanego: a) pochłanianie i magazynowanie ciepła, b) uwalnianie zgromadzonej energii (źródło: Phase Change Energy Solutions)



Rys. 2. Grupy materiałowe wykorzystywane jako PCM (źródło: ZAE Bayern)

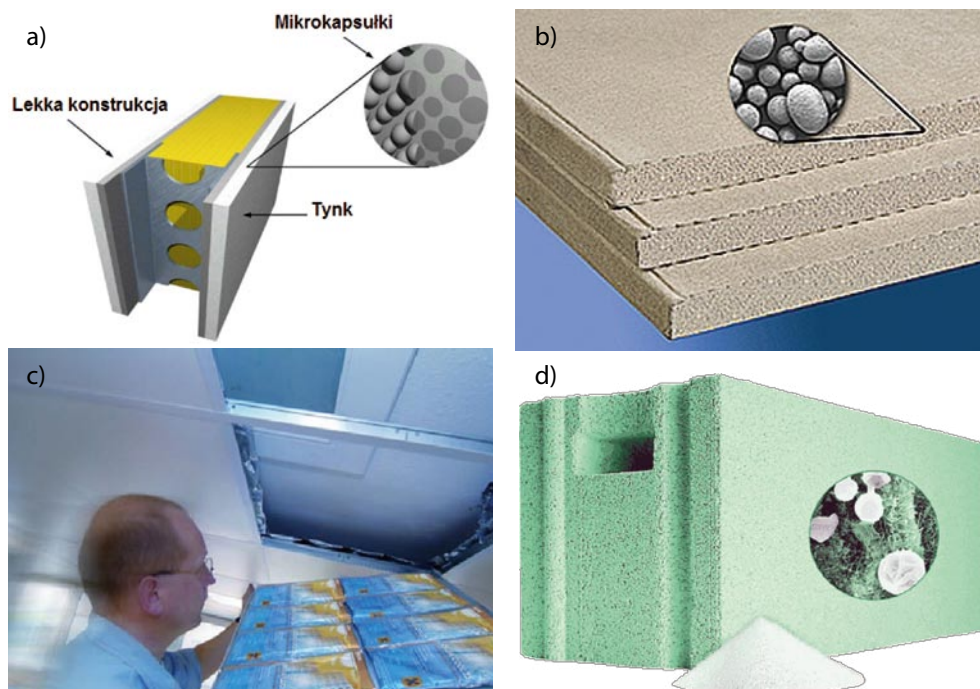
dużej ilości energii, które to procesy zachodzą w kombinacji trzech faz: gazowej, ciekłej lub stałej, jednak najbardziej dostępne i opłacalne jest przejście ze stanu ciekłego do stałego i na odwrót. Główną zaletą materiałów fazowo zmiennych jest ich wysoka efektywna pojemność cieplna. W ich przypadku wzrost akumulacyjności cieplnej wynika

z ciepła właściwego (ang. *sensibleheat*) oraz znacznie wyższego ciepła utajonego (ang. *latentheat*) – ciepła przemiany fazowej [3]. Fakt ten starano się wykorzystać od dawna w obiektach budowlanych, a pierwsze próby w tym zakresie miały miejsce przed rokiem 1980 [4].

W obecnych czasach badania nad PCM skupiają uwagę głównie na poszukiwaniu materiałów o jak najwyższej zdolności akumulacji energii cieplnej z możliwością ich praktycznego wykorzystania – rysunek 2. Nie wszystkie materiały fazowo zmiennne mogą być użyte jako akumulatory ciepła. Materiały badane jako potencjalne PCM powinny spełniać szereg kryteriów: termodynamicznych, kinetycznych, chemicznych, a także ekonomicznych [5, 6]. Przykłady wykorzystania materiałów zmiennych fazowo przedstawiono na rysunku 3.

Bardzo ciekawym przykładem zastosowania materiału zmiennego fazowo jest opatentowany przez Phase Change Energy Solutions innowacyjny system magazynowania termicznego w postaci membrany ENRG Blanket™ (rys. 4)

Rys. 3. Mikrokapsułki PCM zintegrowane w tynku wewnętrznym zastosowanym w lekkiej konstrukcji ściany [5] (a), płyta gipsowo-kartonowa z rdzeniem wypełnionym w 30% PCM (źródło: Basf) (b), system DELTA®-COOL 24 oparty na hydratatach soli jako warstwa chłodząca w konstrukcji sufitu podwieszanego (źródło: Dörken) (c), bloczek z betonu komórkowego CelBloc Plus z wypełnieniem PCM (źródło: H+H Celcon) (d)



Rys. 4. ENRG Blanket™: a) przykładowe membrany, b) widoczny sposób umiejscowienia organicznego czynnika PCM, c) Certyfikat Biobased Product przyznawany przez Departament Rolnictwa Stanów Zjednoczonych (USDA) podkreślający 100% zawartości pochodzenia biologicznego w systemie BioPCM (źródło: Phase Change Energy Solutions)



Rys. 5. ENRG Panel™ z przykładami zastosowania: a) ENRG Panel™ z widocznym wkładem w postaci membrany ENRG Blanket™, b) okładzina ścienna, c) okładzina ścienna ENRG Panel™ zintegrowana z aplikacją optymalizuje wydajność cieplną przestrzeni z zabudową instalacyjną (źródło: Phase Change Energy Solutions)



Rys. 6. Położenie posiadłości Casa Aguila z widocznymi panelami solarnymi (22,1 KW), turbiną wiatrową (3,2 KW) i zbiornikami na wodę o pojemności 10 000 galonów każdy (a), salon [8] (b)

czy też paneli ENRG Panel™ (rys. 5) wykonanych w technologii BioPCM. Warto wspomnieć, że firma Phase Change Energy Solutions jest producentem i projektantem wielu innych rozwiązań materiałowych wykorzystujących technologię BioPCM [7].

System BioPCM został wykorzystany przy budowie posiadłości Casa Aguila zlokalizowanej w Ramonie w Kalifornii (rys. 6 i 7). Posiadłość nazwano na cześć orłów, które szybują nad sąsiednią doliną San Pasqual. Jest to obiekt samowystarczalny z wykorzystaniem źródeł naturalnych, zaprojektowany z uwzględnieniem wszystkich aspektów zrównoważonego rozwoju, w tym wody, energii, materiałów, jakości powietrza w pomieszczeniach i zrównoważonego rozwoju terenu. Jest to pierwszy certyfikowany dom pasywny w San Diego z certyfikatem LEED Platinum. Zbudowany zgodnie

ze standardami domu pasywnego służy jako demonstracja i studium przypadków dla przyszłych wysokowydajnych projektów mieszkaniowych w regionie [8].

Warto zwrócić uwagę na zastosowane rozwiązanie materiałowe wykończenia przegród budowlanych w konstrukcji drewnianej. Jak widać na rysunku 7c, jest to membrana DuPont Energain®PCM o grubości 5 mm, której rdzeń stanowi kopolimer z udziałem 60% PCM (mikrokapsułkowana parafina) wykończony laminatem aluminiowym. Zastosowana parafina charakteryzuje się temperaturą topnienia na poziomie 22°C i temperaturą krzepnięcia 18°C. Następną warstwą jest membrana BioPCM o grubości 15 mm i suchy tynk, wykonany z płyty gipsowo-kartonowej. Jak już wspomniano, BioPCM to opatentowany i zastrzeżony materiał o przemianie fazowej, wytwarzany z naturalnych, niejadalnych



Rys. 7. Obiekt Casa Aguila w czasie realizacji: a) salon z widoczną okładziną ścian i sufitu membraną BioPCM, b, c) wykończenie wewnętrzne ścian i sufitu – płyta g-k + membrana BioPCM + membrana DuPont Energain® PCM o grubości 5 mm [8]

olejów roślinnych w 100% biodegradowalnych i nadających się do recyklingu. Produkty BioPCM wytwarzane są w pięciu standardowych temperaturach topnienia, a mianowicie 21, 23, 25, 27 i 29°C. W niestandardowych zastosowaniach można uzyskać przedział temperaturowy topnienie/krzepnięcie nawet od (-50)°C do 150°C [9].

2. Materiały i metody

Wykorzystywanie materiałów fazowo zmiennych w technologii wyrobów budowlanych to temat wciąż podejmowany przez naukowców, często współpracujących z kadrą inżynierską, czego efektem są oczekiwane innowacyjne rozwiązania, które dzięki zastosowaniu PCM uzyskują znacznie wyższą zdolność do magazynowania ciepła. Stąd zainteresowanie tematem dyplomantów – już dzisiaj mgr inż. Magdaleny Adamczuk i mgr. inż. Błażeja Ciesińskiego. W ramach pracy dyplomowej, odpowiednio magisterskiej i inżynierskiej, podjęli się wykonania badań kompozytów mineralnych z udziałem komercyjnego materiału fazowo zmiennego w postaci mikrokapsułek Micronal®PCM firmy BASF. W pierwszym przypadku tematem pracy była „Ocena wybranych właściwości zapraw modyfikowanych materiałem fazowo zmiennym” [10], w drugim natomiast „Ocena wpływu materiału fazowo zmiennego na właściwości zapraw z udziałem kruszyw lekkich” [11]. Prace realizowano na Wydziale Budownictwa i Architektury w Katedrze Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

W obu pracach pewien zakres badań jest podobny, dlatego z łatwością porównano wybrane parametry techniczne zmodyfikowanych kompozytów materiałem PCM. W pierwszym przypadku modyfikowano gotowy wyrób w postaci gipsowego tynku polimerowego, w drugim zaś były to zaprawy cementowe z udziałem m.in. kruszywa lekkiego wykonane w warunkach laboratoryjnych.

2.1. Materiały

Przedmiotem badań były dwie grupy kompozytów mineralnych, które modyfikowano mikrogranulatem Micronal®PCM

firmy BASF o temperaturze topnienia od 21 do 26°C. Jest on zbudowany z mikroskopijnych polimerowych otoczek, które wypełniono woskowym czynnikiem magazynującym energię (rys. 8).

Zbadano także właściwości komercyjnej zaprawy cementowo-wapiennej o nazwie KlimaTynk PCM 544, zawierającej w swoim składzie 15% mikrokapsułek tego samego typu. Pierwsza grupa – to kompozyty z matrycą gipsową, druga zaś – z matrycą cementową.

Produktem podstawowym, w przypadku wyrobu z matrycą gipsową, była gotowa gładź polimerowo-gipsowa firmy Megaron. Do jej modyfikacji zastosowano mikrokapsułki Micronal®PCM, a także lekkie kruszywo perlit frakcji 0/2.

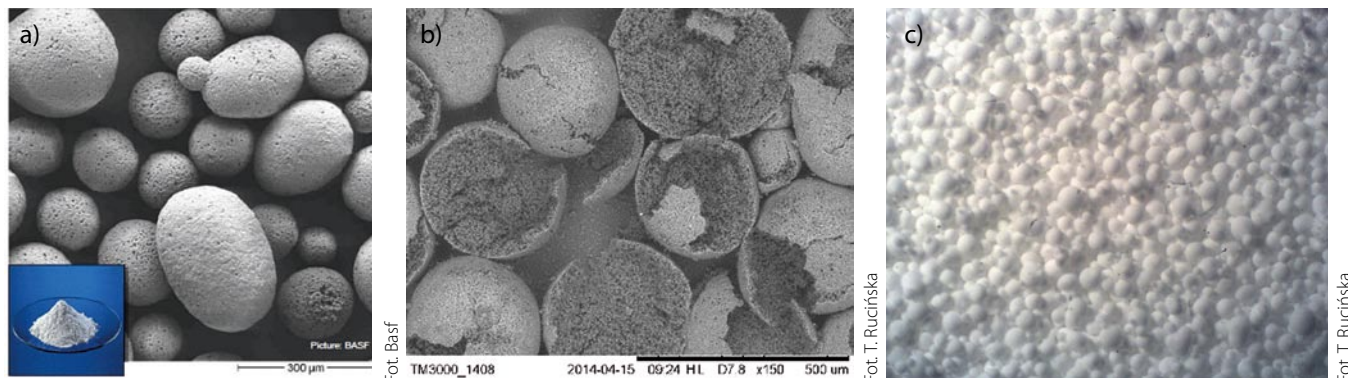
Ostatecznie ustalono wykonanie 6 mieszanek zapraw, a mianowicie:

- dwie zaprawy referencyjne w postaci gotowej mieszanki cementowo-wapiennej o nazwie Tynk-Klima PCM 544 firmy CSV (CW) i gładzi polimerowo-gipsowej (ZPG),
- 3 zaprawy uzyskane poprzez modyfikację gładzi polimerowo-gipsowej, polegającą na wprowadzaniu do mieszanki 10%, 20% i 30% mikrokapsułek Micronal®PCM w odniesieniu do masy suchych składników tynku (ZPG-PCM10/20/30),
- zaprawa na bazie gładzi polimerowo-gipsowej z 10% zawartością Micronalu® PCM i taką samą ilością perlitu (P), które to składniki dozowano wagowo do masy suchego produktu (ZPG-P-PCM).

Do każdej mieszanki ilość wody ustalono empirycznie, tak aby w badaniu na stoliku wstrząsowym mieszanka uzyskała pożądany rozptyw. Wszystkie próbki wykonano w identycznych warunkach laboratoryjnych.

Drugą grupę stanowiły zaprawy cementowe z udziałem lekkiego kruszywa ceramicznego Liapor® frakcji 0/2 i mikrokapsułek Micronal®PCM. Do zrealizowania zaplanowanych badań wykonano w sumie 12 mieszanek zapraw, a mianowicie:

- 4 zaprawy bazujące na drobnoziarnistym kruszywie naturalnym (100% piasku); jedna z nich – zaprawa referencyjna – nie zawierała dodatku PCM (Z0), pozostałe 3 zawierały 10%, 15% i 20% mikrogranulatu Micronal®PCM wprowadzonego do składu wymiennie w ramach objętości kruszywa (Z0 10%/15%/20%),



Rys. 8. Micronal®PCM w postaci mikrokapsułek: a) zewnętrzny widok mikrokapsułek, b) widok mikrokapsułek od środka w powiększeniu 150x, c) mikrokapsułki w powiększeniu 15x

- 4 zaprawy na kruszywie lekkim ceramicznym Liapor (100% objętości kruszywa) w identycznej konfiguracji jak powyżej, czyli jedna zaprawa bez udziału PCM (Z1) i 3 z jego udziałem w ilości jak powyżej (Z1 10%/15%/20%),
- 4 zaprawy z kruszywem łączonym (objętościowo 50% piasku + 50% Liapor) w analogicznych wariantach (Z2; Z2 10%/15%/20%).

W składzie zapraw przyjęto jednakowy udział cementu CEM I 42,5 R oraz objętościowo kruszywa drobnoziarnistego, przy początkowej wartości $w/c=0,5$, wzorując się na składzie ilościowym normowej zaprawy cementowej (1:3). Zastosowano także superplastyfikator Master Rheobuild 1021 firmy Basf w ilości 2% masy cementu, w celu ograniczenia dozowanej dodatkowo wody do mieszanek z porowatym kruszywem Liapor, które w czasie mieszania składników absorbowano znaczącą ilość wody zarobowej. Działo się tak za sprawą bardzo porowatej struktury ziaren frakcji 0/2 powstałych z rozkruszenia ziaren większej średnicy.

Do każdej z zapraw ilość wody dozowanej dodatkowo ustalano empirycznie, stosując jako wyznacznik efekt badania stolikiem rozplýwu. Celem było uzyskanie porównywalnej konsystencji wykonanych mieszanek. Próbkę do poszczególnych oznaczeń wykonano w identycznych warunkach laboratoryjnych.

W obu przypadkach wszystkie badania wykonano na podstawie procedur badawczych grypy norm PN-EN 1015, o głównym tytule: Metody badań zapraw do murów oraz normy PN-EN 13279-2 Spoiwa gipsowe i tynki gipsowe. Część 2: Metody badań.

2.2. Metodyka badań

Przechodząc do metodyki badań, należy zaznaczyć, że będą opisane jedynie badania pokrywające się w zakresie obu prac dyplomowych. Różnica zakresu prac wynikała z faktu, iż jedna z nich była realizowana jako magisterska, druga zaś jako inżynierska.

W obu pracach zakres badań obejmował oznaczenie konsystencji metodą stolika wstrząsowego (rysunki 9 i 10) oraz pomiar gęstości objętościowej świeżej mieszanki.

W celu oznaczenia parametrów wytrzymałościowych oraz cieplnych zaformowano próbki w kształcie beleczek 4x4x16 cm oraz kostki prostokątne o wymiarach 10x10x5 cm, które sezonowano do czasu uzyskania normowej dojrzałości, odpowiednio dostosowanej do rodzaju spoiwa. W ramach badań wytrzymałościowych oznaczono wytrzymałość na zginanie i ściskanie (rys. 11). W zakresie parametrów cieplnych oznaczono współczynnik przewodzenia ciepła i objętościową pojemność cieplną. Parametry cieplne wykonano metodą niestacjonarną przy użyciu aparatu Isomet 2104 (rys. 12) w zmiennych warunkach temperatury, a mianowicie w przypadku produktów gipsowych i KlimaTynku PCM 544: 17, 22, 25 i 30°C, natomiast zapraw cementowych 18, 21, 25 i 30°C. Temperatury dobrano tak, aby skrajne znacząco odbiegały od zakresu, w którym producent wskazał



Fot. M. Adamczuk

Rys. 9. Pomiar średnicy próbki świeżej gładzi gipsowo-polimerowej z dodatkiem PCM



Fot. B. Ciesiński

Rys. 10. Pomiar średnicy próbki świeżej zaprawy cementowej z dodatkiem PCM

topnienie, natomiast pośrednie, by znalazły się między 21 a 26°C. W celu uzyskania stabilnych warunków otoczenia w czasie pomiarów parametrów cieplnych próbki umieszczano w komorze klimatycznej, gdzie przy danej temperaturze przeprowadzono badanie bez kontaktu z otoczeniem zewnętrznym. Dodatkowo pomieszczenie laboratoryjne klimatyzowano do tej samej temperatury, w której wykonywano poszczególne pomiary.

2.3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki podstawowych parametrów technicznych zarówno zapraw z matrycą gipsową, jak i cementową zawierają tabele od 1 do 4.

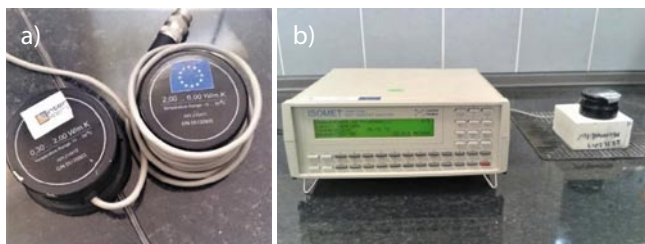
Do oznaczenia rozplýwu zapraw gotowych fabrycznie ZCW (zaprawa cementowo-wapienna KlimaTynk PCM 544) i ZPG (gładź polimerowo-gipsowa) użyto wody w ilości podanej przez producenta wyrobów. Jak widać w tabeli 1, stopień rozplýwu zapraw mieści się w przedziale 150–170 mm,



Fot. M. Adamczuk

Fot. B. Ciesiński

Rys. 11. Badanie wytrzymałości: a) na zginanie – widoczna próbka na bazie gładzi gipsowej z 10% PCM, b) na ściskanie – próbka zaprawy cementowej z PCM



Fot. B. Cieślński

Fot. M. Adamczuk

Rys. 12. Aparat Isomet 2104 do niestacjonarnych pomiarów parametrów cieplnych: a) przylgowe sondy pomiarowe, b) pomiar w trakcie

co pozwala je zakwalifikować do kategorii zapraw plastycznych, których wartość rozplywu według normy PN-EN 1015-3 znajduje się w zakresie 140–200 mm. Dodatkowo, zgodnie z normą PN-EN 13279-2, rozplyw placka zaprawy polimero-wo-gipsowej musiał osiągnąć wartość 165 ± 5 mm. Na podstawie tego pomiaru ustalono stosunek woda/tynk (woda/suche składniki gotowego produktu), który w miarę zwiększania ilości mikrokapsulek rośnie w odniesieniu do zaprawy referencyjnej ZPG. Tak duża ilość dozowanej wody wpłynęła znacząco na gęstość objętościową w stanie suchym, a także na wytrzymałość mechaniczną. Niestety, zaprawy z udziałem mikrokapsulek wykazały tak niską wytrzymałość na zginanie, że w czasie badania urządzenie pomiarowe nie zarejestrowało odczytu. Także wytrzymałość na ściskanie jest dużo niższa zarówno w odniesieniu do zaprawy referencyjnej ZPG, jak i zaprawy cementowo-wapiennej ZCW. Analizując te same parametry w odniesieniu do zapraw

cementowych (tabele od 2 do 4), daje się wyraźnie zauważyć różnicę w ilości wody dodanej do poszczególnych mieszanek z uwagi na wprowadzenie do składu mikrokapsulek PCM, ale przede wszystkim przez zastosowanie lekkiego kruszywa Liapor. Charakteryzuje się ono porowatą strukturą o porach otwartych. Jak już wspomniano, frakcja 0/2 tego kruszywa jest uzyskana z pokruszenia ziaren o większej średnicy, dlatego nie mają one spieczonej zewnętrznej otoczki, która znacznie ogranicza absorpcję wody. Istotne jest także, że mikrokapsułki dozowano wymiennie w ramach objętości kruszywa, odpowiednio 10, 15 i 20%. Te dwa czynniki zdeterminowały gęstość objętościową mieszanek, a także zapraw w stanie suchym. Dla porównania piasek charakteryzuje gęstość $2,65 \text{ g/cm}^3$, kruszywo Liapor $1,58 \text{ g/cm}^3$, natomiast w przypadku Micronal[®]PCM jest to śr. $0,3 \text{ g/cm}^3$.

W zaprawach z kruszywem lekkim Liapor (zaprawy oznaczone Z1 i Z2) tzw. dodatkowo dodana woda, która była konieczna z uwagi na absorpcję wody zarobowej przez to kruszywo w czasie mieszania składników, z czasem odparuje, chociaż jej część może być wykorzystana w procesie hydratacji. Pozytywne jest to, że powolne uwalnianie wody dodatkowej sprzyja samopielegnacji wewnętrznej. W zaprawach tych widoczna jest korzystna relacja między wytrzymałością na zginanie i ściskanie w odniesieniu do zaprawy referencyjnej (Z0). To efekt szorstkiej powierzchni ziaren oraz porowatości otwartej, co sprzyja wzmocnieniu warstwy kontaktowej matryca cementowa-kruszywo.

Tabela 1. Zestawienie podstawowych właściwości zapraw z matrycą gipsową oraz zaprawy cementowo-wapiennej KlimaTynku PCM 544

Zaprawa	ZCW	ZPG	ZPG-PCM 10%	ZPG-PCM 20%	ZPG-PCM 30%	ZPG-P-PCM
Rozplyw [mm]	152,0	162,0	161,0	161,5,0	164,5	169,5
Stosunek woda/tynk [-]	0,337	0,425	0,436	0,470	0,516	0,584
Gęstość objętościowa świeżej mieszanki [g/cm^3]	1630	1630	1460	1200	1110	1140
Gęstość objętościowa zaprawy w stanie suchym [g/cm^3]	1330	1210	1010	950	830	880
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	$\geq 1,8$	$\geq 1,0$	-	-	-	-
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	4,30	7,26	2,99	2,29	1,51	2,09
Wytrzymałość na ściskanie – kategoria wg PN-EN 982-1	CIII	CIII	CII	CII	CII	CII

Tabela 2. Zestawienie podstawowych właściwości zapraw z matrycą cementową i 100% kruszywa naturalnego (piasku)

Zaprawa	Z0	Z0 10%	Z0 15%	Z0 20%
Rozplyw [mm]	140,0	152,5	155	156,0
Stosunek woda/cement [-]	0,500	0,531	0,543	0,586
Gęstość objętościowa świeżej mieszanki [g/cm^3]	2100	2010	1950	1910
Gęstość objętościowa zaprawy w stanie suchym [g/cm^3]	2070	1940	1880	1830
Wytrzymałość na zginanie R_{p28} [MPa]	6,1	5,5	4,7	4,7
Wytrzymałość na ściskanie R_{c28} [MPa]	45,6	28,0	26,6	23,8
Wytrzymałość na ściskanie – klasa wg PN-EN 982-2	Md*	Md	Md	M20

*Md > 25 MPa

Tabela 3. Zestawienie podstawowych właściwości zapraw z matrycą cementową i 100% kruszywa Liapor

Zaprawa	Z1	Z1 10%	Z1 15%	Z1 20%
Rozpliw [mm]	156,3	157,8	153,8	145,8
Stosunek woda/cement [-]	0,977	0,934	0,902	0,869
Gęstość objętościowa świeżej mieszanki [g/cm ³]	1630	1570	1560	1550
Gęstość objętościowa zaprawy w stanie suchym [g/cm ³]	1420	1450	1450	1460
Wytrzymałość na zginanie R_{f28} [MPa]	6,2	6,0	6,1	5,4
Wytrzymałość na ściskanie R_{c28} [MPa]	31,1	29,2	27,0	26,4
Wytrzymałość na ściskanie – klasa wg PN-EN 982-2	Md	Md	Md	Md

Tabela 4. Zestawienie podstawowych właściwości zapraw z matrycą cementową i 50% piasku + 50% Liapor

Zaprawa	Z2	Z2 10%	Z2 15%	Z2 20%
Rozpliw [mm]	151,8	165,0	160,5	156,0
Stosunek woda/cement [-]	0,738	0,703	0,693	0,690
Gęstość objętościowa świeżej mieszanki [g/cm ³]	1870	1860	1860	1850
Gęstość objętościowa zaprawy w stanie suchym [g/cm ³]	1730	1720	1710	1700
Wytrzymałość na zginanie R_{f28} [MPa]	7,0	5,8	5,8	5,2
Wytrzymałość na ściskanie R_{c28} [MPa]	38,0	30,5	29,7	27,0
Wytrzymałość na ściskanie – klasa wg PN-EN 982-2	Md	Md	Md	Md

Na przykładzie zaprawy referencyjnej Z0 daje się zauważyć znaczący wpływ PCM na obniżenie wytrzymałości na ściskanie w granicach 40–50%. Natomiast w przypadku zapraw Z2, na kruszywie mieszanym, jest to nieco ponad 20%. Najkorzystniej wypadły zaprawy Z1 ze 100% udziałem kruszywa porowatego, gdzie spadek wytrzymałości przewyższa nieco 10%. Badania w drugim etapie miały na celu oznaczenie parametrów cieplnych zapraw w zakresie objętościowej pojemności cieplnej i współczynnika przewodzenia ciepła w różnych temperaturach. Uzyskane wyniki badań zapraw z matrycą gipsową oraz zaprawy KlimaTynk PCM 544 przedstawiono na rysunkach 13 i 14.

Analiza rysunku 13 wskazuje na zależność uzyskanych wartości pojemności cieplnej od temperatury otoczenia. Najniższą wartość objętościowej pojemności cieplnej zapraw uzyskano w temperaturze 30°C, poza zaprawą ZPG. W miarę wzrastającej ilości materiału fazowo zmiennego PCM w składzie zapraw na bazie gładzi polimerowo-gipsowej różnica wartości objętościowej pojemności cieplnej także wzrasta.

Analizując wyniki badania uzyskane w temperaturze 22°C w odniesieniu do pomiaru w 30°C, daje się zauważyć, że zaprawę wykonaną na recepturze ZPG-PCM 30% o najwyższej zawartości materiału fazowo zmiennego charakteryzuje pojemność cieplna niższa o 37%, natomiast zapraw ZPG-PCM 20%, ZPG-PCM 10% i ZPG-P-PCM odpowiednio o 26, 9 i 7%. W przypadku zaprawy cementowo-wapiennej ZCW, która w swoim składzie zawiera 15% PCM, odnotowano spadek pojemności cieplnej o 7%.

W porównaniu do zaprawy referencyjnej ZPG pojemność cieplna w temperaturze 30°C jest niższa w przypadku zapraw: ZPG-PCM 10% – o 15%, ZPG-P-PCM 20% – o 28% i ZPG-PCM 30% – o 41%. Zaprawa z udziałem 10% perlitu i 10% PCM (ZPG-P-PCM) wykazała spadek o 50%, a zaprawa ZCW o 9%.

Niskie wartości objętościowej pojemności cieplnej w temperaturze 30°C zapraw modyfikowanych materiałem fazowo zmiennym można tłumaczyć przejściem fazowym materiału PCM, który to stan producent wskazał od 21 do 26°C. Parafina znajdująca się w polimerowych mikrokapsułkach przeszła w stan płynny w wyniku zaabsorbowania energii z otoczenia, w związku z tym nie jest w stanie zakumulować więcej energii. Dopiero przy obniżeniu temperatury otoczenia, a tym samym i próbek badanych zapraw, nastąpi zmiana stanu skupienia materiału fazowo zmiennego, co spowoduje ponowny wzrost objętościowej pojemności cieplnej.

Warto w tym miejscu zauważyć, że objętościowa pojemność cieplna w funkcji temperatury kształtuje się porównywalnie do krzywej przedstawionej na rysunku 16, wyznaczonej na podstawie pojemności cieplnej tynku zawierającego PCM w funkcji temperatury [12].

Uwzględniając powyższe, można stwierdzić, że materiał fazowo zmienny Micronal®PCM korzystnie wpłynął na podwyższenie pojemności cieplnej zapraw z matrycą gipsową w temperaturze 25°C. Porównywalny wzrost tego parametru zanotowano w przypadku gładzi z dodatkiem 20% i 30% mikrokapsulek – pojemność cieplna wzrosła o ok. 12%

w porównaniu z zaprawą wzorcową ZPG. Nie jest to duża różnica, jednak warto zauważyć, że zaprawy gipsowe generalnie charakteryzuje stosunkowo niska gęstość objętościowa (np. w odniesieniu do zapraw cementowych), a to skutkuje obniżoną zdolnością do akumulacji ciepła.

W ramach eksperymentu zmodyfikowano skład gładzi polimerowo-gipsowej, wprowadzając 10% lekkiego kruszywa perlitu oraz 10% PCM (ZPG-P-PCM). Ta zaprawa uzyskała zdecydowanie najniższą pojemność cieplną na tle pozostałych, bez względu na temperaturę pomiaru. Niskie wartości pojemności cieplnej wynikają w tym przypadku z właściwości perlitu, kruszywa charakteryzującego się wyraźnie porowatą strukturą. Natomiast cecha ta pozytywnie wpłynęła na niską wartość współczynnika przewodzenia ciepła (rys. 14).

Wyniki pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła zapraw z matrycą gipsową przedstawiono na rysunku 14. Zauważono, że materiał zmienny fazowo dodany do zaprawy polimerowo-gipsowej wpłynął na obniżenie współczynnika przewodzenia ciepła, co poprawia termoizolacyjność tego kompozytu. Najkorzystniej wypadła zaprawa ZPG-P-PCM 10%. W temperaturze 22°C współczynnik przewodzenia ciepła uzyskał wartość 0,18 W/(m·K), co stanowi 44% wartości w odniesieniu do współczynnika przewodzenia ciepła zaprawy referencyjnej ZPG, oznaczonego w tej samej temperaturze.

Charakterystyka zmienności współczynnika przewodzenia ciepła zapraw ZPG-PCM 10%, ZPG-PCM 20% oraz ZPG-PCM 30% w odniesieniu do temperatury otoczenia od 17°C do 30°C jest zbliżona. Najniższe wartości współczynnika przewodzenia ciepła odnotowano w skrajnych temperaturach pomiaru, natomiast wyraźny wzrost zauważono w temperaturze badania 22°C, po czym następuje spadek wartości λ przy temperaturze pomiaru w 25°C. Najmniejsze różnice uzyskanych wyników pomiaru w zakresie badanych temperatur zauważono w zaprawie polimerowo-gipsowej ZPG i ZPG-P-PCM 10%. Niezależnie od temperatury, współczynnik przewodzenia ciepła przyjmuje wartości na poziomie odpowiednio 0,40–0,435 W/(m·K) i 0,163–0,202 W/(m·K). Natomiast najwyższe wartości współczynnika przewodzenia ciepła wykazała zaprawa cementowo-wapienna ZCW, a szczególnie niekorzystne w temperaturze badania 25°C.

Druga grupa zapraw badanych w zakresie parametrów cieplnych to kompozyty z matrycą cementową. Efekt wykonanych pomiarów przedstawiono na rysunkach 16 i 17. Warto przypomnieć, że w tym przypadku zaprawy podzielono na 3 grupy z uwagi na zastosowaną kombinację kruszyw drobnoziarnistych. Zaprawy Z0 zawierają w 100% piasek kwarcowy, zaprawy Z1 wykonano z udziałem 50% piasku i 50% lekkiego kruszywa oraz zaprawy Z2 zawierają w 100% kruszywo lekkie. Konsekwencją tego było zwiększenie porowatości struktury zapraw z udziałem kruszywa Liapor, a tym samym obniżenie objętościowej pojemności cieplnej oraz współczynnika przewodzenia ciepła. Spodziewano

się, że dodatek PCM zrekompensuje spadek zdolności akumulacyjnych.

Analiza uzyskanych wyników pomiaru objętościowej pojemności cieplnej (rys. 16) wyraźnie wskazuje na zmiany wartości spowodowane temperaturą pomiaru. Najniższe wartości pojemności cieplnej pojawiają się przy temperaturze 30°C. W skrajnych temperaturach, czyli w 18 i 30°C, odnotowano nieznaczne różnice w wartościach pojemności cieplnej, z zaznaczeniem, że w wyższej temperaturze wartości objętościowej pojemności cieplnej są niższe. Najbardziej odbiega od trendu zaprawa referencyjna Z0, którą charakteryzuje najwyższa gęstość objętościowa, a tym samym największa masa w jednostce objętości, w porównaniu do pozostałych zapraw.

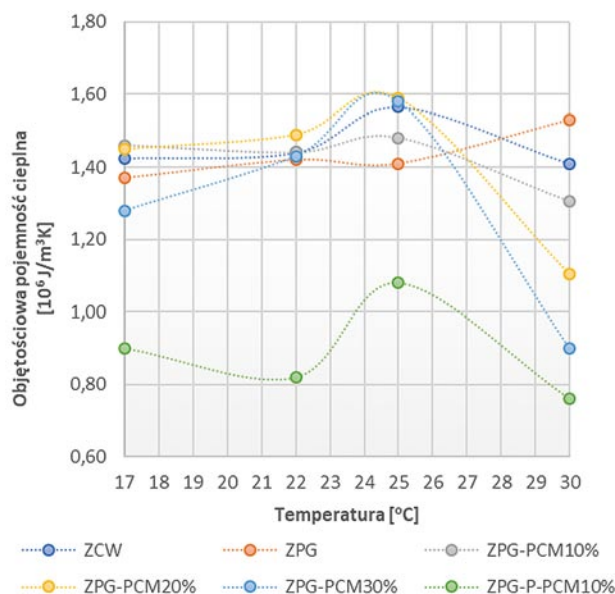
Warto też zwrócić uwagę na wpływ lekkiego kruszywa ceramicznego Liapor na wielkości pomiarów pojemności cieplnej, a także współczynnika przewodzenia ciepła – rysunek 17. Potwierdzono, że im więcej porów w strukturze materiału, tym ten parametr słabnie. Tak więc najniższe wartości odnotowano na zaprawach z udziałem 100% kruszywa lekkiego.

Podobnie jak w przypadkach kompozytów z matrycą gipsową najwyższe wartości pojemności cieplnej w temperaturze 21°C można tłumaczyć zachodzącą przemianą fazową materiału PCM uwięzionego w strukturze badanych zapraw. Jest to dolny zakres temperatury topnienia parafiny wypełniającej mikrokapsułki. Co za tym idzie, kiedy przemiana fazowa się zakończy, materiał nie akumuluje większej ilości energii i następuje drastyczny spadek pojemności cieplnej.

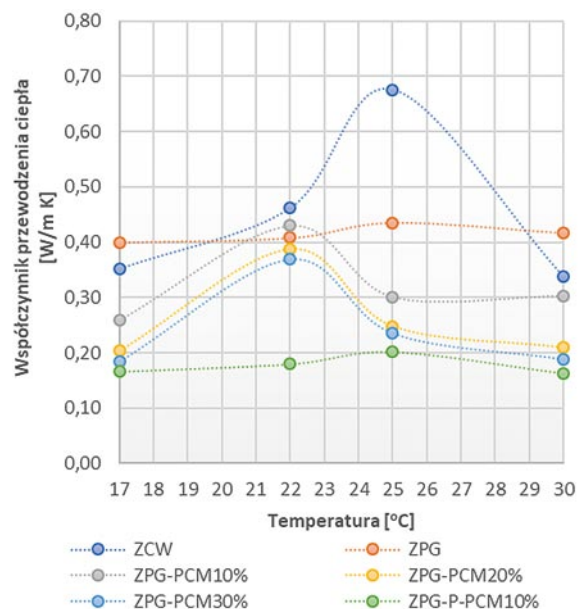
Jak wynika z rysunku 18, zaprawy na piasku wykazały najwyższy współczynnik przewodzenia ciepła, co za tym idzie, najgorsze właściwości termoizolacyjne na tle pozostałych zapraw. Jednak dodatek materiału PCM znacząco poprawia te właściwości. Największy skok widać po dodaniu 10% PCM, ponieważ współczynnik przewodzenia ciepła z wartości 2,0 W/(m·K) zmalał do około 1,6 W/(m·K), zaczynając od temperatury 18°C. Zwiększanie ilości mikrokapsulek Micronal®PCM nadal wpływało korzystnie na izolacyjność cieplną, jednak już z mniejszą intensywnością. Zwiększenie dawki PCM do 20% skutkowało obniżeniem współczynnika przewodzenia ciepła zaprawy referencyjnej o ponad 30% w temperaturze 21°C.

Wyniki badania współczynnika przewodzenia ciepła w przypadku zapraw bazujących na lekkim kruszywie Liapor wykazały, że nawet bez dodatku materiału fazowego znacznie poprawiła się ich izolacyjność termiczna w porównaniu do zapraw z udziałem 100% piasku. W temperaturze 21°C zaprawa bez dodatku PCM ma jedynie 0,734 W/(m·K). Dla tej samej temperatury, przy 20% dodatku materiału fazowego zmiennego jest to 0,662 W/(m·K), co daje spadek współczynnika λ rzędu 10%.

Zaprawy z łączonym kruszywem wykazują ściśle połączone cechy obu kruszyw, jeśli chodzi o wyniki badania współczynnika przewodzenia ciepła. Najwyższy wzrost izolacyjności

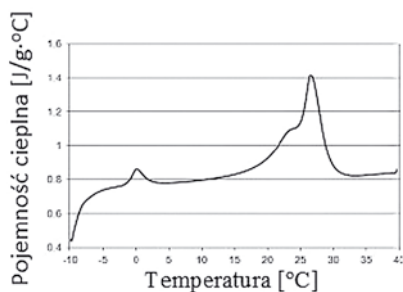


Rys. 13. Charakterystyka objętościowej pojemności cieplnej zapraw z matrycą gipsową w odniesieniu do temperatury pomiaru



Rys. 14. Charakterystyka współczynnika przewodzenia ciepła zapraw z matrycą gipsową w odniesieniu do temperatury badania

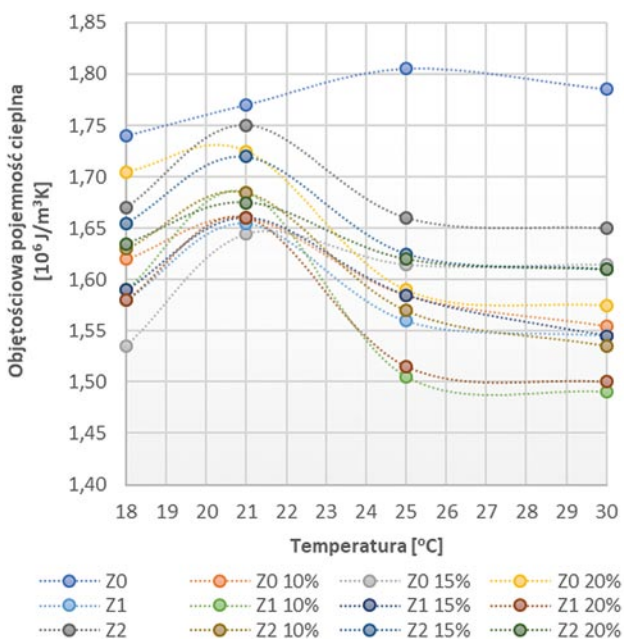
Rys. 15. Pojemność cieplna tynku zawierającego PCM [12]



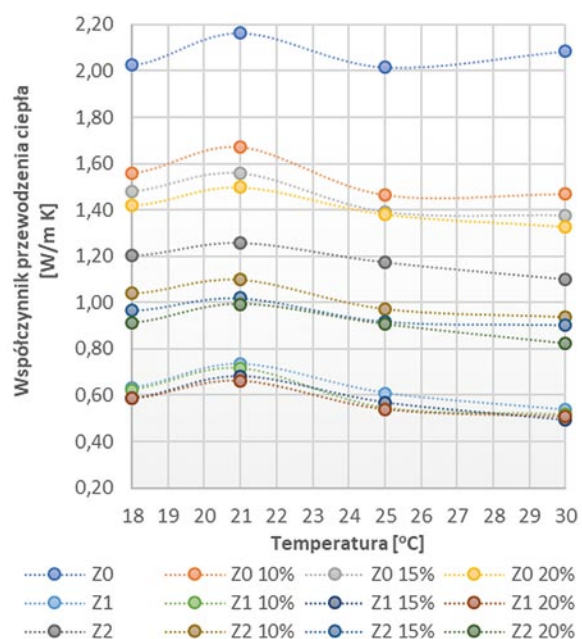
widać po dodaniu 10% materiału fazowo zmiennego, zupełnie jak w przypadku zapraw na piasku, jednakże dalsze zwiększanie dodatku PCM jest również zauważalne, co z kolei było cechą zapraw z lekkim kruszywem Liapor.

3. Podsumowanie

Badania wykonane w zakresie obu prac dyplomowych oraz analiza uzyskanych wyników pozwala na stwierdzenie, iż:



Rys. 16. Charakterystyka objętościowej pojemności cieplnej zapraw z matrycą cementową w funkcji temperatury



Rys. 17. Charakterystyka współczynnika przewodzenia ciepła zapraw z matrycą cementową w funkcji temperatury

- spadek gęstości objętościowej wszystkich badanych zapraw spowodowany był wprowadzeniem materiału fazowo zmiennego w postaci mikrokapsułek Micronal®PCM. Jednak w zaprawach z matrycą cementową znaczący wpływ na ten parametr miało kruszywo lekkie ceramiczne Liapor;
- mikrokapsułki wprowadzone do składu zapraw, z różnym skutkiem, ale jednak obniżyły wytrzymałość na ściskanie;
- zaprawy z matrycą gipsową zmodyfikowane materiałem PCM wykazały znikomą wytrzymałość na zginanie, czego nie zaobserwowano w zaprawach z matrycą cementową – wytrzymałość ta malała w miarę zwiększania PCM, ale nie więcej niż do ok. 25%;
- uzyskane wyniki badania współczynnika przewodzenia ciepła wykazują korzystny wpływ mikrokapsułek Micronal®PCM, a także kruszywa lekkiego, na właściwości termoz izolacyjne wszystkich badanych zapraw;
- analiza wyników objętościowej pojemności cieplnej wykazała wzrost akumulacyjności zapraw modyfikowanych materiałem fazowo zmiennym Micronal®PCM w zakresie temperatury 21–25°C. To co jednak zastanawia, to fakt, że kompozyty z matrycą gipsową osiągały najwyższe wartości pojemności cieplnej w temperaturze badania 25°C, natomiast z matrycą cementową już w temperaturze 21°C. Obie temperatury mieszczą się w zakresie topnienia wskazanym przez producenta, jednak dany rodzaj produktu ma zwykle wskazaną konkretną temperaturę przemiany fazowej. Opierając się na badaniach przedstawionych w [13], wnioskuje się, że przyczyną takiego stanu może być zróżnicowana porowatość całkowita badanych kompozytów, rozkład porów i ich wielkość;
- w przypadku gładzi polimerowo-gipsowych z udziałem PCM (o najniższej gęstości objętościowej) zaobserwowano anomalię w związku między objętościową pojemnością cieplną a współczynnikiem przewodzenia ciepła w temperaturze 25°C. Przyczyną tego może być fakt, że w zastosowanej metodzie pomiaru wyznaczenie parametrów cieplnych oparte jest na zapisach cyklicznie badanej temperatury jako funkcji czasu. Energia dostarczana przez sondę pomiarową podgrzewa próbkę, ale może być także wykorzystana do przemiany fazowej PCM, co prowadzi do zafałszowania wyniku pomiaru.

Na podstawie badań parametrów cieplnych wykazano, iż dodanie mikrokapsułek Micronal®PCM poprawia pojemność cieplną w zakresie temperatury topnienia wskazanym przez producenta. Nie można przy tym pominąć faktu, iż w skomponowanych zaprawach z matrycą gipsową nastąpiło wyraźne obniżenie wytrzymałości mechanicznej w miarę zwiększania ilości mikrokapsułek. Parametr ten jest istotny z punktu widzenia trwałości użytkowej zaprawy i wymaga dopracowania, zwłaszcza w zakresie wytrzymałości na zginanie. Dlatego nowym wyzwaniem może być zrealizowanie pracy dyplomowej, której celem

będzie poszukiwanie rozwiązania wzmocnienia struktury tych kompozytów.

Warto też wspomnieć, że wykonanie badań w ramach obu prac dyplomowych było możliwe dzięki przekazaniu nieodpłatnie materiału fazowo zmiennego przez firmę Basf, producenta mikrokapsułek Micronal®PCM. Współpraca z przedstawicielem firmy Basf Polska zaowocowała także zorganizowaniem dwóch konferencji naukowo-technicznych. Jedna z nich odbyła się na Wydziale Budownictwa i Architektury w grudniu 2011 r., pn. „Wykorzystanie materiałów zmiennofazowych w budownictwie”, po czym spotkanie zostało przeniesione do restauracji Secesja Cafe, gdzie nastąpiła prezentacja pomieszczeń, w których podczas remontu wykorzystano materiał zmienny fazowo w zaprawie tynkarskiej oraz wylewce posadzkowej. Druga konferencja miała miejsce w marcu 2012 r. w hali targowej, w czasie trwania Międzynarodowych Targów Budowlanych BUD-GRYF w Szczecinie. Tematem konferencji była „Redukcja kosztów eksploatacji budynków – właściwości i wykorzystanie materiałów zmiennofazowych”. W ramach konferencji przedstawiono możliwości wykorzystania materiałów budowlanych z zastosowaniem materiałów fazowo zmiennych PCM. W obu konferencjach udział wzięli nie tylko przedstawiciele nauki i firm z regionu, ale także studenci WBiA, między innymi Magdalena Adamczuk, która przekazała swoje zainteresowanie materiałami PCM młodszemu koledze Błażejowi Ciesińskiemu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Raoux S., Wuttig M., Phase Change Materials, Science and Applications, Springer, 2009
- [2] Jaworski M., Pomiary temperatury przemiany fazowej i stopnia przechłodzenia materiałów stosowanych do akumulacji ciepła (PCM), Biuletyn Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej 88/2001, Warszawa
- [3] Garbalińska H., Zastosowanie nowoczesnych materiałów w celu poprawy parametrów cieplnych przegród budowlanych, Materiały Budowlane 5/2014, str. 117–119
- [4] Voelker C., Kornadt O., Ostry M., Temperature reduction due to application of phase change materials, Energy and Buildings 40/2008, str. 937–944
- [5] Cabeza L., Mehling H., Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications, Springer, 2008
- [6] Melhing H., Latent heat storage with a PCM-graphite composite material: experimental results for the first test store, Proceeding of the 4th Workshop of IEA ECES IA Annex 10, Bendiktbeuern, Germany, 1999
- [7] <https://phasechange.com> (z dnia 7.08.2020)
- [8] <https://casa-aguila.com/green-features/> (z dnia 7.08.2020)
- [9] <http://www.conservationssolutions.com/phase-change.html> (z dnia 8.08.2020)
- [10] Adamczuk M., Ocena wybranych właściwości zapraw modyfikowanych materiałem fazowo zmiennym, Praca dyplomowa magisterska, Wydział Budownictwa i Architektury/ZUT w Szczecinie, 2014
- [11] Ciesiński B., Ocena wpływu materiału fazowo zmiennego na właściwości zapraw z udziałem kruszyw lekkich, Praca dyplomowa inżynierska, Wydział Budownictwa i Architektury/ZUT w Szczecinie, 2016
- [12] Pavlík Z., Pavlíková M., Volfová P., Kaulich V., Ondruška J., Ondruška Z., Změškal Z., Černý R., Properties of a New Type of Plaster Containing Phase-Change Material, IACSIT Press 28/2012, Singapore
- [13] Lucas S. S., Ferreira V. M., Barroso de Aguiar J. L., Latent heat storage in PCM containing mortars – Study of microstructural modifications, Energy and Buildings 66/2013, str. 724–731