

Badanie kompozytu opartego na lekkich wypełniaczach (len i perlit) do zastosowań w budownictwie jako materiał ścienny

Dr hab. inż. prof. PL Stanisław Fic, mgr inż. Przemysław Brzyski, Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

1. Wprowadzenie

Zrównoważony rozwój w budownictwie jest możliwy, gdy wykorzystuje się odnawialne surowce lub surowce wtórne z odpadów budowlanych albo z materiałów rozbiórkowych przetworzonych w drodze recyklingu. Przykładem surowców z sektora rolnictwa są włókna oraz zdrewniałe części lnu oraz konopi. Materiały te są ostatnio przedmiotem badań dotyczących wykorzystania ich jako składnika materiałów budowlanych [1, 2, 3, 5]. Na zachodzie Europy powstało już wiele budynków z paździerzy konopnych, wiązanych spoiwem mineralnym. W Polsce uprawa tych roślin drastycznie spadła w latach 90., jednak w nowy popyt na produkty lub odpady pochodzące z tych roślin jest argumentem za rozwojem tych upraw.

W niniejszej pracy opisano rezultaty prac badawczych nad możliwością wykorzystania w budownictwie odnawialnego surowca rolnego, jakim jest len. Badania te są kontynuacją przeprowadzonych już badań własnych [6, 7]. Słoma lniana oraz włókno posłużyły jako wypełniacz ekologicznego kompozytu na bazie spoiwa wapiennego modyfikowanego dodatkami wpływającymi na polepszenie parametrów technicznych. Lekki kompozyt zawierający również ciepłochronne kruszywo lekkie (perlit ekspandowany) może pełnić funkcję konstrukcyjno-izolacyjną jako wypełnienie drewnianej konstrukcji szkieletowej. Określono podstawowe właściwości mechaniczne i fizyczne kompozytu, stosując różne kompozycje pod względem ilości użytego wypełniacza lnianego i perlitu.

Tabela 1. Receptury badanych kompozytów

	K1	K2	K3
Wapno hydratyzowane	W	W	W
Cement II/A 42,5R	C=50%·W (wagowo)	C=50%·W (wagowo)	C=50%·W (wagowo)
Metakaolinit	MK=10%·(C+W) (wagowo)	MK=10%·(C+W) (wagowo)	MK=10%·(C+W) (wagowo)
Spoivo	S=W+C+MK	S=W+C+MK	S=W+C+MK
Perlit ekspandowany	P=100%·S (objętościowo)	P=100%·S (objętościowo)	P=150%·S (objętościowo)
Len	L=100%·S (objętościowo)	L=150%·S (objętościowo)	L=100%·S (objętościowo)
Woda	75%·S (wagowo)	75%·S (wagowo)	75%·S (wagowo)
Superplastyfikator	1%·W	1%·W	1%·W

2. Materiały przyjęte do badań

Z uwagi na docelowy ekologiczny charakter badanego kompozytu jako spoiwo w przeważającej części przyjęto wapno hydratyzowane. Ze względu na powolny proces wiązania i twardnienia spoiwa powietrznego w wyniku karbonatyzacji, spoiwo zmodyfikowano poprzez dodanie materiału hydraulicznego (cement portlandzki CEM II/A 42,5 R) oraz wysoce reaktywnej pulcolany (metakaolinit). Dążąc do uzyskania małego ciężaru objętościowego stwardniałego kompozytu zdecydowano się na wykorzystanie kruszywa lekkiego – perlitu ekspandowanego o frakcji 0-4 mm. Głównym wypełniaczem, wykorzystywanym w innych badaniach własnych [6, 7] jest słoma lniana wraz z włóknem, pobrane z gospodarstwa rolnego w powiecie krasnostawskim. Materiał ten wykorzystano w formie pociętych kawałków o długości ok. 15-25 mm. Ciężar lnu w stanie luźno nasypowym wynosi około 50 g/dm³.

3. Receptury

Przeprowadzone badania opierały się na trzech recepturach, z których wykonano poszczególne zaroby (K1, K2, K3). Receptury opierały się na identycznym składzie spoiwa, natomiast różniły się ilością wypełniaczy – perlitu ekspandowanego oraz lnu. Po wymieszaniu spoiwa dodano lekkie kruszywo oraz wypełniacz lniany. W celu wyeliminowania wpływu wysokiej chłonności słomy lnianej należy uwzględnić to w ilości wody zarobowej lub wstępnie namoczyć len albo

go zaimpregnować. W niniejszych badaniach słomę lnianą wstępnie moczo. Płukanie w wodzie miało na celu również oczyszczenie słomy z kurzu i pyłów. Aby upłynnić mieszanekę i ułatwić mieszanie, zastosowano superplastyfikator. W tabeli 1 zaprezentowano skład przyjętych w badaniach receptur.

4. Zakres badań

Kompozyt przebadano pod kątem podstawowych właściwości fizykomechanicznych, a także cieplnych. Właściwości mechaniczne uzyskano z badań określających wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na rozciąganie. W obu przypadkach badanie przeprowadzono na próbkach w kształcie sześcianu o wymiarach 100x100x100 mm. Natomiast właściwości fizyczne określono na podstawie badań gęstości materiału, szczelności, porowatości, nasiąkliwości wagowej oraz skurczu. Badanie dotyczące skurczu przeprowadzono na próbkach o wymiarach 160x40x40 mm. Pozostałe właściwości fizyczne zbadano na wycinanych próbkach o wymiarach 70x60x50 mm. Spośród właściwości cieplnych zbadano współczynnik przewodności cieplnej w płytowym aparacie Bocka na próbkach o wymiarach 250x250x50 mm. Z uwagi na niski ciężar wypełniacza lnianego oraz dużą jego zawartość objętościową w mieszance, praktycznie nie jest możliwe zagęszczenie jej pod wpływem siły ciężkości. Efektem takiego zagęszczania byłaby duża porowatość oraz bardzo niska wytrzymałość stwardniałego materiału. Mieszanekę zagęszczano więc w formie ręcznie, poprzez ubijanie – w taki sam sposób jak mieszanekę umieszczoną w deskowaniu ściennym na budowie.

Przeprowadzony szereg badań odbył się po 28 dniach dojrzewania próbek w warunkach laboratoryjnych, czyli w temperaturze $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $60\% \pm 5\%$. Każde pojedyncze badanie zostało wykonane na trzech próbkach z jednej receptury.

5. Właściwości mechaniczne

5.1. Wytrzymałość na ściskanie oraz rozciąganie

Ze względu na niski ciężar docelowego kompozytu oraz brak norm dotyczących badania kompozytów wapiennych z udziałem lnu posłużono się normą PN-EN 89/B-06258 przy badaniu właściwości mechanicznych [8]. Norma odnosi się do betonów lekkich, a konkretnie do autoklawizowanego betonu komórkowego. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie wykonano na maszynie wytrzymałościowej po 28 dniach. Test wykonano nadając głowicy ściskającej prędkość 5 mm/min (rys. 1). Wyniki przedstawiono na rysunku 2.

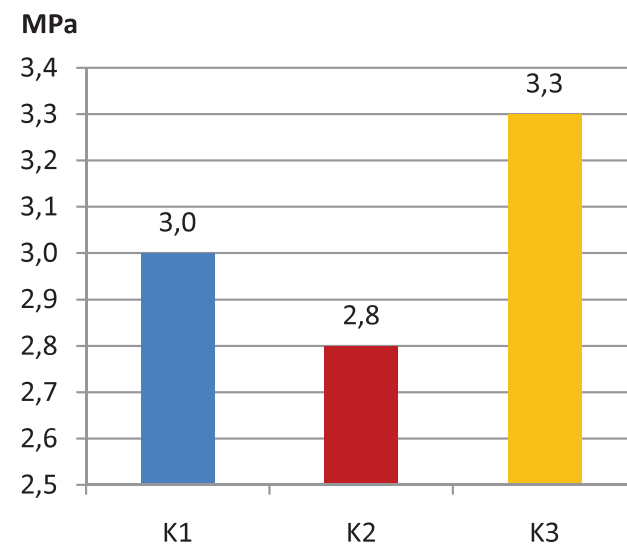
Na podstawie wyników można stwierdzić, iż wytrzymałości nie odbiegają od siebie znacząco. Najwyższa wytrzymałość została osiągnięta przez K3, gdzie przeważa wypełniacz w postaci perlitu, natomiast najniższą wytrzymałość odnotowano dla kompozytu K2, w którego

składzie zastosowano najwięcej lnu. Warto dodać, że próbki poddane obciążeniu nie wykazały nagłego zniszczenia, lecz zachowywały się w sposób plastyczny. Kiedy siła ściskająca osiągnęła graniczną wartość, utrzymywała się ona na stałym poziomie lub naprężenia lekko narastały, natomiast próbka nie rozpadła się, lecz odkształcała. Spowodowane jest to obecnością włókien, zszywających materiał, pełniących funkcję mikrobrojenia, a także porowatym, ściśliwym charakterem kompozytu.

Oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie kompozytu dokonano metodą przez rozłupanie. Metoda ta polega na tym, że rozłupanie następuje w chwili maksymalnego obciążenia, lecz dopiero po pewnym odkształceniu i zmniejszeniu się obciążenia, w związku z tym badanie zostało przerwane w chwili, gdy próbka nie została jeszcze całkowicie rozłupana, a obciążenie zaczynało się zmniejszać. Płaszczyzny próbki były do siebie prostopadłe. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 4.



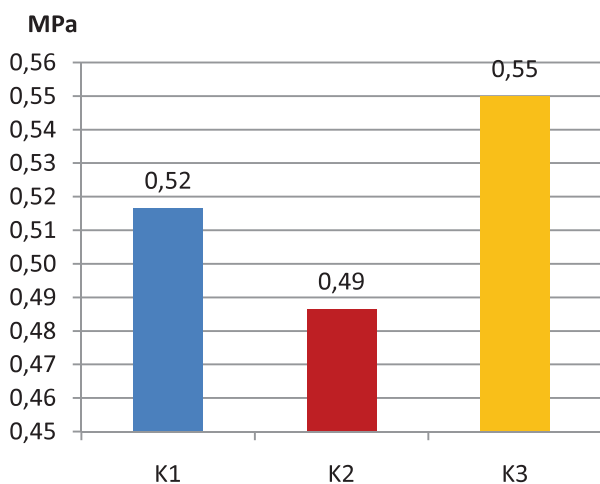
Rys. 1. Próba ściskania kompozytu



Rys. 2. Średnia wytrzymałość na ściskanie kompozytów



Rys. 3.
Zniszczona próbka
po badaniu wytrzymałości na rozciąganie



Rys. 4. Średnia wytrzymałość na rozciąganie kompozytów

Powyższe wyniki również potwierdzają najlepsze właściwości mechaniczne dla K3, natomiast najniższe dla K2, jednak wyniki znacznie nie odbiegają od siebie. Tutaj siła niszcząca również nie spowodowała rozłupania próbki, czego nie można zaobserwować podczas testowania betonu komórkowego, gdzie następuje nagle rozłupanie i spadek siły. Postać zniszczenia pokazana na rysunku 3 otrzymana została poprzez celowe zwiększenie opadu głowicy by rozłupać próbkę. W tym badaniu również włókna Iniane udowodniły korzystny wpływ na cechy kompozytu.

6. Właściwości fizyczne

6.1. Gęstość, szczelność, porowatość

Gęstość objętościową kompozytu określono na 3 próbkach z każdej receptury za pomocą wagi hydrostatycznej. W tym celu próbkę wysuszono do stałej masy i zważono. Następnie próbkę moczo w wodzie aż do chwili braku przyrostu masy. Zważono próbkę w stanie nasyconym

w powietrzu oraz w wodzie. Na wadze hydrostatycznej ważono próbki nasączone ze względu na wysoką wczesną nasiąkliwość próbki. Ważenie próbki suchej pod wodą dałoby zawyżony wynik. Na podstawie otrzymanych wyników wyliczono objętość próbki oraz gęstość pozorną.

Gęstość właściwą materiału wyznaczono metodą piknometryczną w warunkach laboratoryjnych w temperaturze otoczenia około 24°C. Na podstawie wyliczonych gęstości obliczono porowatość otwartą, całkowitą oraz szczelność. Porowatość otwarta wyrażona jest jako procentowy stosunek pomiędzy objętością otwartych porów i objętości próbki. Porowatość całkowita wyrażona jest jako procentowy stosunek objętości porów (otwartych i zamkniętych) do objętości próbki. Szczelność wyraża się jako stosunek gęstości objętościowej do gęstości właściwej. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Uzyskanie możliwie najniższej gęstości objętościowej było jednym z celów niniejszych badań. Wpływ na jej wartość miała ilość spoiwa oraz wypełniacza w mieszance. Najwyższą gęstość otrzymano dla K1 (0,9 g/cm³), gdzie sumaryczny udział wypełniaczy wynosił 200% objętości użytego spoiwa, natomiast najniższą dla K2 (0,85 g/cm³) oraz K3 (0,86 g/cm³), gdzie wykorzystano wypełniacze w ilości 250% objętości spoiwa.

Sposób zagęszczania oraz duży udział lekkich, porowatych wypełniaczy zadecydował o wysokiej porowatości stwardniałego kompozytu. Korzystne wartości uzyskano dla K3, który uzyskał najwyższą wytrzymałość, najwyższą porowatość oraz najniższą gęstość (obok K2). Przedstawione wyniki decydują o dobrych parametrach izolacyjności termicznej, zachowując najwyższą wytrzymałość. Wynikiem wysokiej porowatości jest niska szczelność kompozytu, co przełoży się na wysoką nasiąkliwość. Jednak można ją ograniczyć stosując zabieg impregnacji, co było przedmiotem innych badań własnych.

6.2. Skurcz

Skurcz wyznaczono na podstawie normy PN-EN 89/B-06258, przy użyciu aparatu Graf-Kaufmana w warunkach laboratoryjnych w temperaturze otoczenia około 24°C. Badanie polegało na ustawieniu beleczek w aparacie Graf-Kaufmana na środku powierzchni 40 x 40 mm (rys. 5). Pobrano dwie wartości pomiarów, od razu po rozformowaniu oraz po 28 dniach dojrzewania. Beleczki dojrzewały na powietrzu. Zrezygnowano z eksykatora celem sprawdzenia, jak materiał zachowa się w warunkach otoczenia. Skurcz policzono wg wzoru (1):

$$e_i = \frac{l_2 - l_1}{l_0}$$

w którym:

l_2 – wielkość pomiaru po 28 dniach [mm],

l_1 – wielkość pomiaru od razu po rozformowaniu [mm],

l_0 – długość beleczki [m],

e_i – skurcz [mm/m].

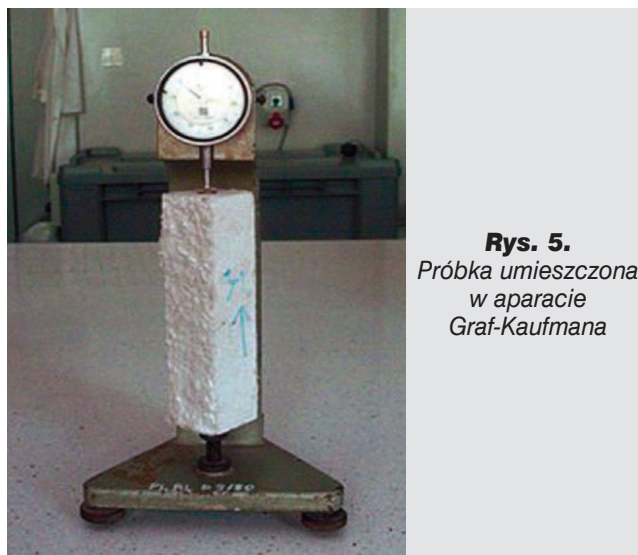
Tabela 2. Wybrane właściwości fizyczne badanych kompozytów

	K1	K2	K3
Gęstość objętościowa [g/cm ³]	0,90	0,85	0,86
Gęstość właściwa [g/cm ³]	2,35	2,32	2,35
Porowatość otwarta [%]	27,0	25,0	25,4
Porowatość całkowita [%]	61,7	63,4	63,4
Szczelność [%]	38,3	36,6	36,6

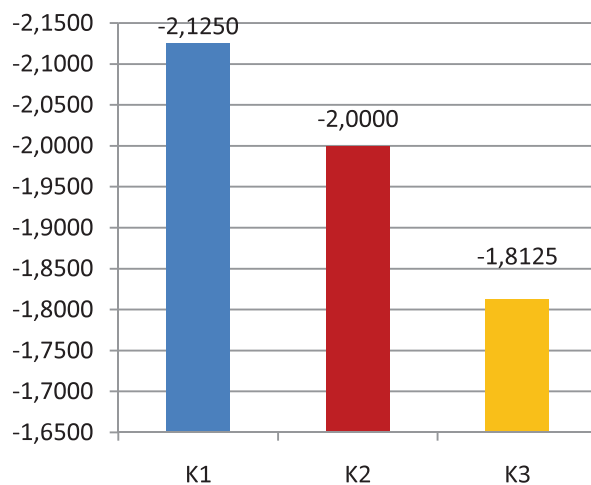
Wyniki badań skurczu przedstawiono na rysunku 6. Wartość skurczu wyniosła około 2 mm/m. Nie przeprowadzono szczegółowej analizy skurczu, jednak można wysunąć kilka wniosków na podstawie literatury [4]. Występujący skurcz w dużej mierze warunkowany jest znaczną ilością wody w mieszance, której część zostaje odparowana w trakcie wysychania próbek, a użyte spoiwo powietrzne wyklucza możliwość wilgotnej pielęgnacji próbek w początkowej fazie dojrzewania. Obok dominującego skurczu od wysychania ze względu na obecność spoiwa wapiennego występuje tu skurcz karbonatyzacyjny. Powstająca woda w wyniku reakcji $Ca(OH)_2$ z dwutlenkiem węgla z otoczenia odparowuje, powodując skurcz. Jednak udział tego skurczu jest niewielki z uwagi na długotrwały proces karbonatyzacji. Występuje w przypowierzchniowej warstwie kompozytu i ma niewielki wpływ na jego deformację, a jedynie na zarysowania powierzchni. Skurcz autogeniczny z kolei jest zminimalizowany poprzez zredukowanie samoosuszania w wyniku zastosowania nasiąkliwych wypełniaczy, które magazynują wodę do dalszej hydratacji cementu użytego jako część spoiwa.

6.3. Nasiąkliwość masowa

Nasiąkliwość jest to stosunek masy wody, którą zdolny jest wchłonąć badany materiał do jego masy w stanie suchym, wyrażony w procentach. Badanie polegało na moczeniu próbek w wodzie i ważeniu ich w określonych odstępach czasu. Na podstawie masy określana jest wilgotność próbki w danej chwili. Woda penetruje do wnętrza materiału wypełniając pory. Wilgoć wchłonięta przez materiał znajduje się na jego zewnętrznej powierzchni oraz we wnętrzu zawartych w nim porów. Cząsteczki wody oddziałują wzajemnie z powierzchnią materiału oraz z cząsteczkami wody zawartej w powietrzu, wypełniającym pory. Natomiast napięcie powierzchniowe wody wywołuje jej dalszą migrację w materiale. Próbki przed rozpoczęciem badania nasiąkliwości nie zostały wysuszone do stałej masy. Ich wilgotność sięgała około 34%. Pomiar nasiąkliwości wagowej próbek kompozytu przeprowadzono dla kilku okresów: po 10 minutach, 20 minutach, 30 minutach, 1 godziny, 3 godzin, 6 godzin, 1 dnia, 3 dni. Małe odstępy czasowe w początkowym okresie badania dobrane zostały z uwagi na znaczną chłonność wody przez słomę lnianą w celu dokładnego zobrazowania nasiąkliwości, gdyż znaczna chłonność następuje w pierwszych minutach badania. Założono maksymalny czas badania równy

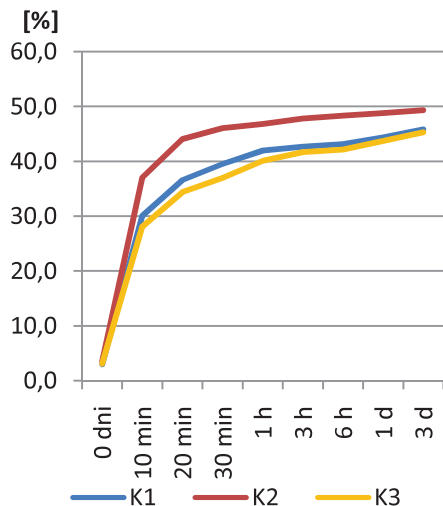


Rys. 5. Próbką umieszczona w aparacie Graf-Kaufmana



Rys. 6. Średni skurcz badanych kompozytów

3 dni ze względu na docelowe zastosowanie kompozytu jako materiał ścienny. Nie jest on przewidziany jako materiał, który może być stale narażony na działanie wody. Wyniki zaprezentowano na rysunku 7. Przyrost masy próbek w trakcie badania nasiąkliwości był porównywalny dla wszystkich receptur. Można stwierdzić, że jest to wysoka nasiąkliwość, gdyż po 3 dniach wyniosła ona ok. 45-49%. Najwyższą nasiąkliwość wykazał kompozyt K2 (49,3%), zawierający najwięcej słomy lnianej objętościowo, natomiast najniższą, lecz porównywalną z K1, miał kompozyt K3 (45,3%), zawierający najwięcej perlitu. Wszystkie próbki wchłonęły ponad 90% całkowitej zabsorbowanej wody, w pierwszych



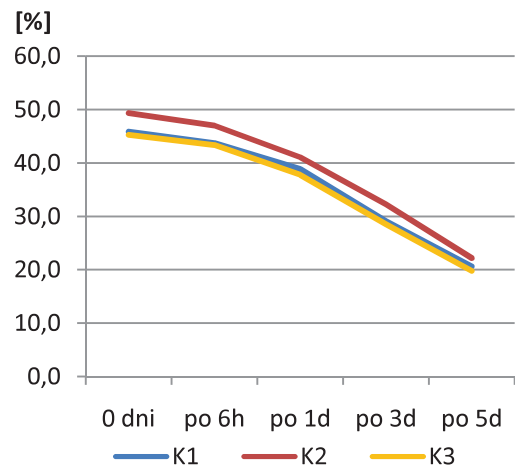
Rys. 7. Wykres nasąkliwości masowej badanych próbek

20 minutach po zanurzeniu. W dalszym okresie badań, wzrost nasąkliwości był minimalny.

6.4. Zdolność odparowania

Ze względu na obecność organicznego materiału w kompozycji pożądane jest, aby wykazywał on zdolności do uwalniania wilgoci. Jest to materiał chłonny, ale poprzez dość szybkie odparowanie zabsorbowanej wilgoci może regulować poziom wilgotności w pomieszczeniach. Po zakończeniu badania nad nasąkliwością wagową, próbki zostały osuszone z wody a następnie pozostawione w warunkach laboratoryjnych w temperaturze $20 \pm 5^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $60 \pm 5\%$ w celu schnięcia. W tym czasie określano szybkość schnięcia próbek, mierząc ubytek masy próbek, świadczący o ilości odparowanej wody (rys. 8). Założono okres trwania badania, równy 5 dni.

Przez 5 dni wilgotność próbki nie spadła do poziomu wyjściowego tj. ok. 3-4%, lecz do około 20%. Najwięcej



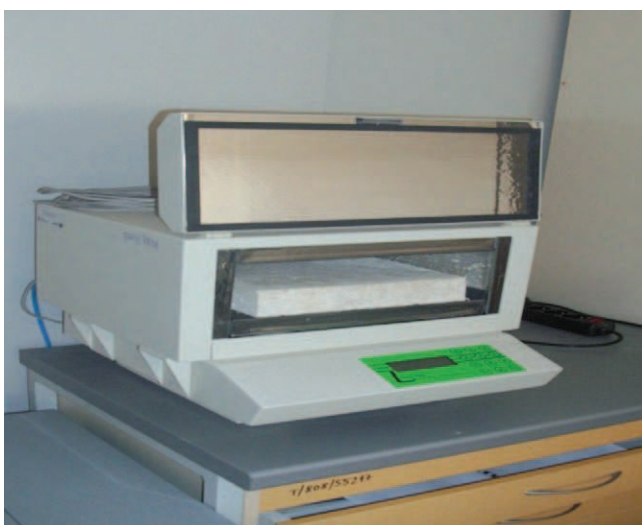
Rys. 8. Wykres zdolności odparowania badanych próbek

wody oddała próbka K2 (różnica poziomów wilgotności w porównaniu z wyjściową to ok. 27%). Nieco mniej wilgoci oddały próbki K1 i K3 (różnica poziomów wilgotności ok. 25%). Ma to związek z większą ilością wypełniacza lnianego, a tym samym większą porowatością kompozytu K2 (w porównaniu z K1), która ułatwiła dyfuzję pary wodnej przez materiał. Różnice te jednak są nieznaczne.

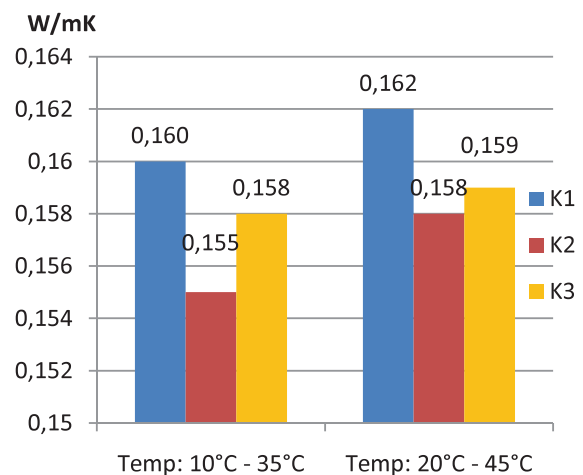
7. Właściwości cieplne

7.1. Współczynnik przewodności cieplnej

W celu sprawdzenia wpływu naturalnych wypełniaczy na izolacyjność cieplną zbadano współczynnik przewodności cieplnej w płytowym aparacie Bocka na próbkach $250 \times 250 \times 50$ mm (rys. 9). Badanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 89/B-06258 [8]. Porównano przewodność cieplną, zakładając dwa przedziały temperatury pomiędzy płytą grzejącą a chłodzącą. Pierwszy



Rys. 9. Próbką umieszczoną w płytowym aparacie Bocka



Rys. 10. Współczynnik przewodności cieplnej badanych kompozytów

z nich to temperatura pomiędzy 10°C a 35°C, drugi to 20°C a 45°C. Badanie w obu przypadkach zostało przeprowadzone z różnicą temperatur wynoszącą 25°C. Uzyskane wartości współczynnika przewodności cieplnej przedstawiono na rysunku 10.

Badany kompozyt zawiera składniki, którymi można modyfikować przewodność cieplną stwardniałego kompozytu zmieniając ich ilość. Najniższą wartość λ uzyskał K2, zawierający największą ilość objętościową wypełnienia lnianego. Na podstawie wyników stwierdzić można, że większa ilość lnu niż perlitu w kompozycie wpływa minimalnie korzystnie na przewodnictwo cieplne kompozytu. Najlepsze parametry izolacyjne wykazał kompozyt K1, w którym zastosowano najmniej lekkiego wypełniacza w stosunku do objętości spoiwa.

8. Podsumowanie

Otrzymany kompozyt wykazał odpowiednią charakterystykę wytrzymałościową, aby możliwe było wykorzystanie go jako materiału wypełniającego konstrukcję szkieletową. Zachowując objętościowe proporcje użytych wypełniaczy można modyfikować spoiwo, by uzyskać oczekiwane wytrzymałości. Aby spełnić obecne wymagania cieplne dotyczące granicznego współczynnika przenikania ciepła dla ścian zewnętrznych, stosując badany kompozyt jako materiał ścienny należałoby

dołożyć warstwę typowego materiału termoizolacyjnego. Jednak zwiększając udział wypełniaczy w mieszance można zwiększyć izolacyjność termiczną kompozytu kosztem wytrzymałości. Będzie on wtedy wykazywał większą porowatość oraz mniejszą gęstość objętościową. Dobierając odpowiednią recepturę, kompozyt może być wykorzystany zatem do różnych zastosowań.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Arnaud L., Gourlay E., Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, *Construction and Building Materials*, Volume 28, Issue 1, March 2012, Pages 50–56
- [2] Bevan R., Woolley T., *Hemp Lime Construction: A Guide to Building with Hemp Lime Composites*. Bracknell 2010
- [3] Brigitte de Bruijna P., Jeppssona K. H., Sandinb K., Sandinb K., Nilssona C., Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems Engineering*, volume 103, 2009
- [4] Domagała L., Skurcz i pęcznienie lekkich betonów kruszywowych modyfikowanych fazą włóknistą. *Czasopismo techniczne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*. 1-B/2008
- [5] Elfordy S., Lucas F., Tancret F., Scudeller Y., Goudet L., Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hempcrete") manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, volume 22, 2008
- [6] Fic S., Brzyski P., Szelağ M., Composite based on foam lime mortar with flax fibers for use in the building industry. *Ecological and Chemistry Engineering*. A. Nr 7-8/2013
- [7] Fic S., Brzyski P., Szelağ M., Ocena ważności izopolowania naturalnych kompozytów z dodatkami lnianych włókien w stroitelstwie. *Bisnik No 53 Odessa 2014*, str. 393-399
- [8] PN-EN 89/B-06258: Autoklawizowany beton komórkowy

I Forum Przemysłowe Miejskie Ogólnopolska Konferencja Naukowa pt. „Budownictwo infrastrukturalne – miejskie w programach finansowych Unii Europejskiej”

12 czerwca 2015 r. Katowice, Aula Główna Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach

Sesja 1. **Budownictwo miejskie w dzisiejszej kulturze** – „Przestrzeń miejska wobec zjawiska depopulacji i potrzeb seniorów”, „Jak rozbudować przestrzeń publiczną w dobie kryzysu sfery publicznej? Czy można stworzyć zdrową przestrzeń publiczną, która będzie alternatywą dla centrów konsumpcji?”, „Krajowa Polityka Miejska – zobowiązania czy inspiracja?”

Sesja 2. **Polska kulturalnym regionem Europy dzięki programom finansowym** – „Jak fundusze europejskie zmieniają Polskę? Co się zmieniło w polskich miastach w okresie programowania 2007-2013, przykłady zagospodarowania przestrzeni publicznych, nowe wymagania, technologie i materiały”, „Regionalny Program Operacyjny na lata 2014-2020 szansą na dynamiczny rozwój przestrzeni miejskich”.

Sesja 3. **Aspekty ekologiczne kształtowania przestrzeni miejskiej** – „Kształtowanie współczesnych obszarów miejskich w kontekście zrównoważonego rozwoju”, „Architektura zieleni – projektowanie i wykonawstwo, ścieżki rowerowe i chodniki, oświetlenie stosowane w infrastrukturze”, „Miasto przyjazne mieszkańcom i środowisku”, „Rewitalizacja przyrodnicza terenów zurbanizowanych”, „Niskoemisyjna gospodarka miejska”.

Sesja 4. **Mała architektura miejska w natarciu** – „Nowe wymagania, technologie i materiały – przykłady rozwiązań w praktyce”, „Estetyzacja przestrzeni publicznej”.