

prof. zw. dr hab. inż. Michał Boltryk<sup>1)</sup>  
mgr inż. Anna Krupa<sup>2)\*</sup>

# Kompozyty cementowe z wypełniaczem organicznym modyfikowane domieszkami

*Cement composites with the organic filler modified admixture*

DOI: 10.15199/33.2015.12.14

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości lekkich kompozytów cementowych z wypełniaczem organicznym typu trzcina pospolita (frakcja 2/10 i 10/20 mm) oraz trociny z drzew iglastych (0/2 mm). Trzcina *Phragmites australis* jest szczególnie powszechną rośliną w Polsce, która rośnie na terenach podmokłych, natomiast trociny są produktem odpadowym występującym podczas obróbki mechanicznej drewna. Określono właściwości kompozytu cementowego z wymienionymi wypełniaczami organicznymi, takie jak gęstość pozorna, nasiąkliwość i wytrzymałość na ściskanie. Z badań wynika, że istnieje możliwość wykorzystania odpadowych surowców roślinnych do produkcji betonów jako zamiennika kruszyw mineralnych. Wykazano również słuszność wprowadzenia zmiennej ilości domieszki upłynniającej i uszczelniającej, dzięki czemu można uzyskać materiał o dobrych właściwościach fizykomechanicznych.

**Słowa kluczowe:** kompozyt cementowy, trzcina, trociny, domieszki.

**Abstract.** The results concerning the determination of properties of lightweight cement composites with organic fillers, such as common reed (fraction 2/10 and 10/20 mm) and conifer sawdust (fraction 0/2 mm) are presented in this paper. The reed *Phragmites australis* is a notably common plant in Poland that grows on waterlogged lands, and sawdust is a waste product that appears during the mechanical processing of wood. The properties of lightweight cement composites with organic fillers, such as the apparent density, the water absorbability, the compressive strength. The research suggests that there is a possibility of using waste materials and plant materials for the production of concrete as a replacement for mineral aggregates. It has been demonstrated that the introduction variable amounts of admixtures is justified and you can get material with good physical and mechanical properties.

**Keywords:** cement composite, reed, sawdust, admixtures.

W wyniku eksploatacji obiekty budowlane ulegają zużyciu i wymagają napraw, remontów, rekonstrukcji lub wzmocnień [1]. Rozwój gospodarki kraju, wzrost świadomości społeczeństwa oraz względy ekonomiczne wymuszają na przemyśle poszukiwanie nowych materiałów budowlanych, najlepiej z surowców odnawialnych. Kluczowe staje się też wykorzystywanie wszystkich możliwych surowców odpadowych, będących uzupełnieniem surowców naturalnych, co jest działaniem proekologicznym i wpisuje się w strategię zrównoważonego rozwoju. Ze względu na ograniczone zasoby kruszyw skalnych, dążenie do uzyskania coraz lepszych konstrukcji oraz potrzebę wykorzystania odpadów z przemysłu, leśnictwa i rolnictwa zmierza się do upowszechnienia stosowania kruszyw odpadowych z betonów lekkich [2]. Uzasadnione staje się też wykorzystywanie surowców odpadowych pochodzenia organicznego. W artykule przedstawiono wyniki badań nad kompozytami cementowymi z wypełniaczami organicznymi, w których jako wypełniacz zastosowano odpady drewna iglastego w postaci trocin oraz trzcinę pospolitą, która jest jedną z najpopularniejszych roślin występujących na terenach podmokłych w wielu krajach. Trzcina znajduje zastosowanie w budownictwie jako materiał o korzystnych właściwościach termoizolacyjnych, a także ma walory ekologiczne, gdyż w trakcie wzrostu pochłania CO<sub>2</sub> z powietrza, wbudowując go w strukturę swoich tkanek. Otrzymane wyniki badań dowodzą, że wyroby trzcinobetonowe mogą być wykorzystane podczas renowacji budynków i modernizacji obszarów zabudowanych jako wyroby termoizolacyjne i akustyczne.

## Zakres i metodyka badań

W ramach badań określono wpływ domieszki upłynniającej i uszczelniającej na cechy mieszanki i stwardniałego kompozytu cementowego z zastosowaniem wypełniaczy organicznych. Zawartość domieszki upłynniającej na bazie polikarboksylation (czynnik X<sub>1</sub>) wynosiła 0 ÷ 2%, a domieszki uszczelniającej (czynnik X<sub>2</sub>) 0 ÷ 4% w stosunku do masy cementu. Przeprowadzono dziewięć serii badań, przyjmując podstawowy skład mieszanki w postaci cementu, wody zarobowej i kruszywa organicznego na podstawie wcześniej wykonanych badań optymalizacyjnych [5, 6]. Ostatecznie przyjęto ilość kruszywa organicznego – 174,01 kg/m<sup>3</sup>, wyjściową zawartość wody – 439,56 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> i cementu portlandzkiego o wysokiej wczesnej wytrzymałości klasy CEM I 32,5R – 400 kg/m<sup>3</sup>. Zastosowano następujące frakcje kruszywa pochodzenia organicznego:

- trociny z drewna iglastego o granulacji 0 ÷ 2 mm – 48,6%;
- kruszywo drobne z trzciny o granulacji 2 ÷ 10 mm – 25,4%;
- kruszywo grube z trzciny o granulacji 10 ÷ 20 mm – 26%.

Macierz planowania eksperymentu w przypadku wielkości kodowanych i rzeczywistych domieszki upłynniającej (X<sub>1</sub>) i uszczelniającej (X<sub>2</sub>) przedstawiono w tabeli 1.

W celu zneutralizowania szkodliwych związków zawartych w kruszywach pochodzenia organicznego oraz stabilizacji cech fizykochemicznych zastosowano mineralizatory. Proces mineralizacji pozwala uzyskać cząstki wypełniacza uodpornione na gnienie, o zwiększonej twardości i mniejszej chłonności wody, lepszej przyczepności do zaczynu cementowego, a także mniejszej podatności na zmiany objętościowe. W przedstawionych badaniach jako substancji mineralizującej wypełniacz organiczny użyto 9% siarczanu glinu Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> i 18% wapna hydratyzowanego Ca(OH)<sub>2</sub> w stosunku do całkowitej masy kruszywa pochodzenia organicznego. Działanie siarczanu gli-

<sup>1)</sup> Politechnika Białostocka, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. prof. Edwarda F. Szczepanika w Suwałkach

<sup>2)</sup> Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. prof. Edwarda F. Szczepanika w Suwałkach

\*) Autor do korespondencji; e-mail: annairis@wp.pl

**Tabela 1. Macierz planowania eksperymentu w przypadku rzeczywistych i kodowanych czynników wejściowych w postaci domieszki upłynniającej ( $X_1$ ) i domieszki uszczelniającej ( $X_2$ )**

Table 1. Experiment planning matrix for a natural and encoded input factors as liquefying admixture ( $X_1$ ) and waterproofing admixture ( $X_2$ )

Nr serii	Wielkości kodowane		Wielkości rzeczywiste			
	$x_1$	$x_2$	$X_1$ domieszka upłynniająca		$X_2$ domieszka uszczelniająca	
			[%]	[kg]	[%]	[kg]
1	-1	-1	0,3	1,2	0,6	2,4
2	1	1	1,7	6,8	3,4	13,6
3	-1,414	0	0,0	0,0	2,0	8,0
4	1,414	0	2,0	8,0	2,0	8,0
5	0	-1,414	1,0	4,0	0,0	0,0
6	0	1,414	1,0	4,0	4,0	16,0
7	0	0	1,0	4,0	2,0	8,0
8	-1	1	0,3	1,2	3,4	13,6
9	1	-1	1,7	6,8	0,6	2,4

nu jako mineralizatora jest bardzo skuteczne, gdyż zabezpiecza on substancję organiczną przed rozkładem i rozwojem czynników niszczących oraz wpływa na zmniejszenie nasiąkliwości i higroskopijności tworzywa. Rola wapna polega na zwiększeniu skuteczności mineralizatora i lepszym uplastycznieniu mieszanki.

**Wyniki badań**

Analizę wpływu domieszki upłynniającej i uszczelniającej na właściwości kompozytów cementowych wykonano na 81 próbkach o wymiarach 10 x 10 x 10 cm. Po 28 dniach dojrzewania wybrano losowo z każdego zarobu po 6 próbek do badania wytrzymałości na ściskanie  $f_{c,28}$  oraz po 3 próbki do badania nasiąkliwości  $n_w$  i gęstości pozornej  $\rho_p$ . Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

**Gęstość pozorną** kompozytów cementowych określano wg normy PN-EN 12390-7:2011. Na podstawie analizy statystycznej, stosując kryterium F Snedecora (Fishera), odrzucono hipotezę o braku istotnego wpływu czynników  $X_1$  i  $X_2$  oraz interakcji pomiędzy tymi czynnikami na gęstość pozorną. Z prawdopodobieństwem 95% stwierdzono, że wszystkie czynniki wpływają istotnie na analizowaną właściwość. Jako funkcję opisującą zmianę gęstości pozornej przyjęto wielomian drugiego stopnia postaci:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 \quad (1)$$

gdzie:

$x_1, x_2$  – kodowane (bezwymiarowe) wartości naturalnych czynników;  
 $b_1, b_2, \dots, b_n$  – współczynniki równania regresji, które obliczono metodą Levenberga-Marquardta.

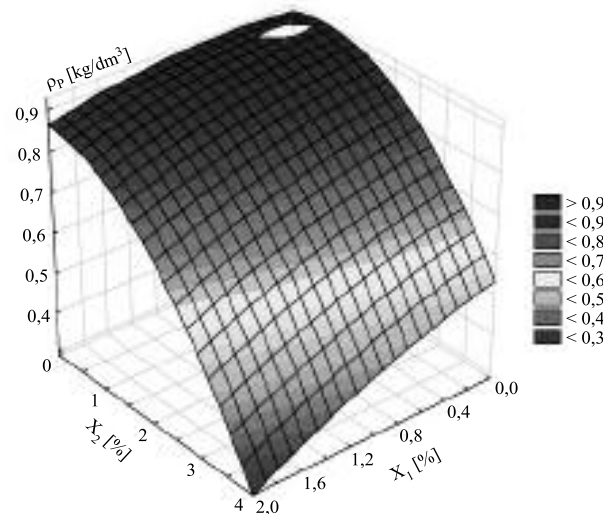
Liczba niewiadomych  $b_i$  jest mniejsza od liczby układów planu równej 9, co powoduje spełnienie warunku koniecznego ze względu na kryterium informatywności planu. Równanie opisujące zmianę gęstości pozornej opracowano z uwzględnieniem wszystkich istotnych czynników:

$$\hat{y} = 0,910659 + 0,027455x_1 + 0,043072x_2 - 0,025000x_1x_2 - 0,025520x_1^2 - 0,034272x_2^2 \quad R^2 = 0,84 \quad (2)$$

**Tabela 2. Wyniki badania wpływu zawartości domieszki upłynniającej (czynnik  $X_1$ ) i domieszki uszczelniającej (czynnik  $X_2$ ) na właściwości kompozytów cementowych**

Nr serii	$\rho_p$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	$n_w$ [%]	$f_{c,28}$ [MPa]
1	0,773	56,38	3,13
2	0,891	39,75	4,44
3	0,827	52,74	3,34
4	0,880	43,56	4,88
5	0,746	49,88	2,91
6	0,926	24,42	4,16
7	0,911	33,02	3,89
8	0,869	37,21	2,95
9	0,896	44,73	4,31

Na rysunku 1 przedstawiono wykres zmienności gęstości pozornej w zależności od zawartości domieszki upłynniającej ( $X_1$ ) i uszczelniającej ( $X_2$ ). Z badań wynika, że gęstość pozorna zależy od obu założonych czynników wejściowych. Określono dodatni liniowy i ujemny kwadratowy efekt danego czynnika. Stwierdzono również ujemny efekt wspólnego oddziaływania czynników  $X_1$  i  $X_2$ . Wynika z tego, że gęstość pozorna zmniejsza się w przypadku stosowania coraz większej ilości domieszek. Przy maksymalnej zawartości rozpatrywanych czynników uzyskano spadek gęstości pozornej kompozytu cementowego o ok. 70% w porównaniu z kompozytem bez domieszek.



**Rys. 1. Zmiana gęstości pozornej w zależności od zawartości domieszki upłynniającej ( $X_1$ ) i domieszki uszczelniającej ( $X_2$ )**

Fig. 1. Change of density depending on the content of liquefying admixture ( $X_1$ ) and waterproofing admixture ( $X_2$ )

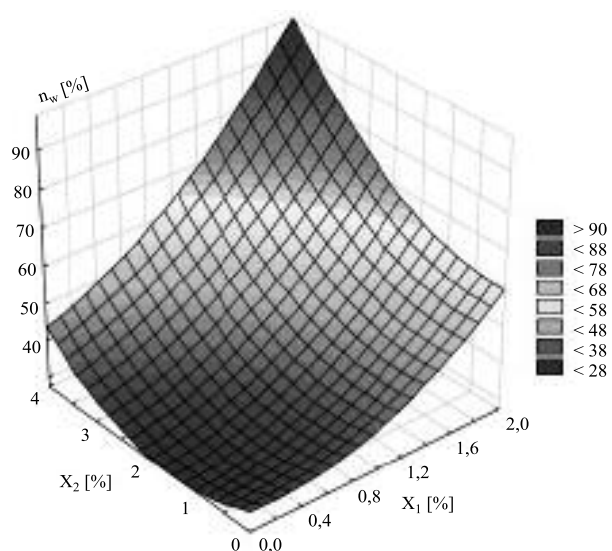
**Nasiąkliwość  $n_w$**  kompozytów cementowych określono na podstawie różnicy masy próbek nasyconych wodą i wysuszonych do stałej masy. Do opisu przestrzeni czynnikowej wybrano postać (1). Wszystkie współczynniki okazały się istotne i ostatecznie model statystyczny przyjął postać:

$$\hat{y} = 33,01887 - 2,76333x_1 - 7,51893x_2 + 3,55x_1x_2 + 8,03539x_1^2 + 2,532890x_2^2 \quad R^2 = 0,94 \quad (3)$$

Na podstawie uzyskanego równania regresji (3) oceniono, że czynniki  $X_1$  i  $X_2$  wykazują efekt ujemny liniowy oraz dodatni kwadratowy. Największy wpływ na nasiąkliwość kompozytów wykazuje czynnik  $X_2$ . Synergii obu czynników zaobserwowano w przypadku zawartości domieszki upłynniającej (czynnik  $X_1$ ) w ilości do 0,5% oraz domieszki uszczelniającej (czynnik  $X_2$ ) w ilości 0,5 ÷ 2,5%. Kompozyty cementowe na bazie wypełniaczy organicznych oraz inne materiały o charakterze izolacyjno-konstrukcyjnym, takie jak wiórobeton, keramzytobeton, perlitobeton, beton komórkowy mają bardzo dużą porowatość, a tym samym dużą nasiąkliwość. Interpretację graficzną uzyskanych wyników z uwzględnieniem rzeczywistych wartości czynników wejściowych przedstawiono na rysunku 2.

**Wytrzymałość na ściskanie  $f_{c,28}$**  badano zgodnie z procedurą podaną w PN-EN 12390-3: 2011. Na podstawie oceny parametrów funkcji regresji (1) stwierdzono, że współczynniki  $b_3, b_4, b_5$  należy uznać za nieistotne ( $\alpha > 0,05$ ). Otrzymało liniową zależność (4) wytrzymałości na ściskanie od zawartości domieszki upłynniającej i uszczelniającej w postaci:

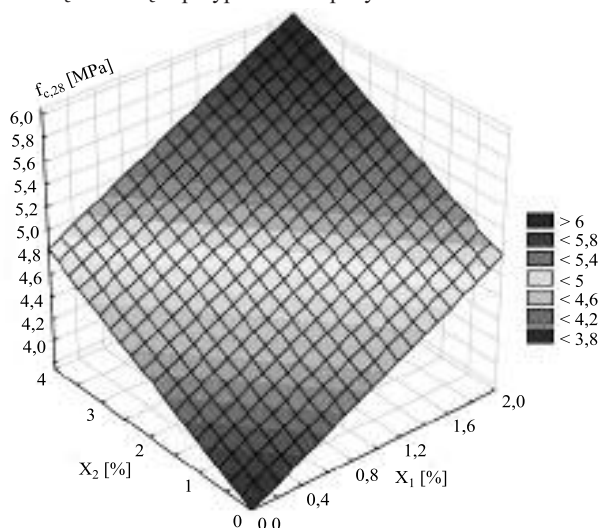
$$\hat{y} = 3,74241 + 0,608882x_1 + 0,272172x_2 \quad R^2 = 0,49 \quad (4)$$



**Rys. 2.** Zmiana nasiąkliwości w zależności od zawartości domieszki upłynniającej ( $X_1$ ) i domieszki uszczelniającej ( $X_2$ )

*Fig. 2.* Change of water absorptivity depending on the content of liquefying admixture ( $X_1$ ) and waterproofing admixture ( $X_2$ )

Na rysunku 3 przedstawiono na wartościach rzeczywistych czynników  $X_1$  i  $X_2$  interpretację graficzną zmiany wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania w warunkach powietrzno-suchych. Materiały izolacyjno-konstrukcyjne z wypełniaczem organicznym i mineralnym mają porównywalną wytrzymałość na ściskanie. Na podstawie równania regresji (4) odnotowano dodatni liniowy efekt zarówno czynnika  $X_1$ , jak i  $X_2$ . Największy wpływ na wytrzymałość wykazuje czynnik  $X_1$ , czyli zawartość domieszki upłynniającej. Zaobserwowano, że wzrost wartości wytrzymałości na ściskanie ( $f_{c,28}$ ) następuje przy jednoczesnym zwiększaniu się udziału domieszki upłynniającej ( $X_1$ ) i uszczelniającej ( $X_2$ ). Przy maksymalnej zawartości rozpatrywanych czynników wytrzymałość kompozytu cementowego zwiększa się ok. 60% w porównaniu z wytrzymałością ustaloną w przypadku kompozytu bez domieszek.



**Rys. 3.** Zmiana wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania w zależności od zawartości domieszki upłynniającej ( $X_1$ ) i domieszki uszczelniającej ( $X_2$ )

*Fig. 3.* Change of compressive strength after 28 days of ripening depending on the content of liquefying admixture ( $X_1$ ) and waterproofing admixture ( $X_2$ )

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości dziewięciu serii kompozytów cementowych z wypełniaczami organicznymi w postaci trocin i trzciny. Na podstawie analizy statystycznej opracowano równania opisujące zmiany badanych cech w założonych przedziałach rozpatrywanych zmiennych. Ustalono kompatybilność obu domieszek oraz celowość ich stosowania, dzięki czemu można uzyskać kompozyty cementowe o dobrych parametrach fizyczno-mechanicznych, które są porównywalne z wynikami badań publikowanymi przez innych autorów [3, 4]. Domieszka upłynniająca (czynnik  $X_1$ ) w kombinacji z domieszką uszczelniającą (czynnik  $X_2$ ) nadaje badanym kompozytom właściwości hydrofobowe, dzięki czemu nastąpiła poprawa badanych cech w porównaniu z kompozytami niezawierającymi domieszek. Dzięki dodatkowi domieszki upłynniającej w ilości do 1% oraz domieszki uszczelniającej do 3%, w stosunku do masy cementu, uzyskano nasiąkliwość do 30% i wytrzymałość na ściskanie ok. 4 MPa, która wzrasta wraz ze wzrostem zawartości domieszki. Kompozyty cementowe z wypełniaczem organicznym, jako materiały o silnie porowatej strukturze, należą do materiałów nasiąkliwych. Wielkość nasiąkliwości jest uzależniona od struktury wewnętrznej. Im większa jest porowatość kompozytu, tym większa jest jego nasiąkliwość oraz mniejszy ciężar objętościowy i wytrzymałość na ściskanie. W związku z tym badany materiał wymaga dodatkowego zabezpieczenia przed warunkami atmosferycznymi, np. w postaci tynku zewnętrznego. Kompozyty cementowe z wypełniaczami organicznymi ze względu na mniejszą masę od klasycznego betonu mogą stanowić pełnowartościowy materiał przy renowacji starych stropów, konieczności odciążenia konstrukcji oraz podczas wykonywania nadbudowy obiektów. Bardzo mała gęstość pozorna może świadczyć o tym, że kompozyty cementowe z wypełniaczami organicznymi mogą lepiej chronić budynki przed utratą ciepła. Natomiast izolacyjność akustyczna badanych materiałów wpływa na lepsze tłumienie dźwięków w porównaniu ze standardowym betonem. Badane kompozyty cementowe, ze względu na podobną strukturę i właściwości do stosowanego w budownictwie wiórobetonu, mogą być stosowane jako materiał izolacyjno-konstrukcyjny oraz dźwiękochłonny na ekrany akustyczne. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość wykorzystania roślinnych surowców odpadowych do wytwarzania ekologicznych wyrobów.

## Literatura

- [1] Runkiewicz L.: Określenia dotyczące napraw i wzmocnień konstrukcji budowlanych, Przegląd Budowlany, 10/2006, s. 3 – 6.
- [2] Jamróży Z.: Beton i jego technologie, Warszawa, PWN 2003.
- [3] Turgut P.: Cement composites with limestone dust and different grades of wood sawdust, Building and Environment, 42/2007, s. 3801 – 3807.
- [4] Arnaud L., Gourlay E.: Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, Construction and Building Materials, 28/2012, s. 50 – 56.
- [5] Bołtryk M., Pawluczuk E.: Properties of a lightweight cement composite with an ecological organic filler, Construction and Building Materials, 51/2014, s. 97 – 105.
- [6] Bołtryk M., Krupa A.: Metody zabezpieczania wypełniaczy organicznych w kompozytach cementowych. Wybrane zagadnienia rewitalizacji obiektów budowlanych cz. IV. Badania właściwości materiałów i konstrukcji, Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii w Płocku, ISBN – 978-83-62081-83-7, Płock 2014, s. 215 – 226.

Przyjęto do druku: 14.07.2015 r.