

PONOWNE ZASTOSOWANIE SPOIWA CEMENTOWEGO ODZYSKANEGO Z ZAPRAWY RECYKLINGOWEJ

Maciej SWIRYDZIUK*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań nad możliwością odzyskania spoiwa cementowego z zaprawy recyklingowej. Spoiwo cementowe uzyskano w wyniku domielenia wyprażonej zaprawy recyklingowej w laboratoryjnym młynku planetarnym. Zaprojektowano 10 składów zapraw cementowych z różną zawartością materiału wtórnego. Następnie wykonano badania właściwości mechanicznych. Wyniki badań wykazują, że częściowe zastąpienie cementu domieloną zaprawą recyklingową, w nowo projektowanych zaprawach jest możliwe.

Słowa kluczowe: zaprawa recyklingowa, spoiwo cementowe, właściwości mechaniczne.

1. Wprowadzenie

Spoiwo hydrauliczne w postaci cementu jest podstawowym materiałem wiążącym wykorzystywanym przy produkcji betonów i zapraw. Powstaje w wyniku wypalenia w wysokiej temperaturze około 1450°C surowców mineralnych (margiel lub wapień i glina) na klinkier cementowy. W dalszej kolejności klinkier mielony jest z gipsem, który pełni rolę regulatora czasu wiązania. W 1824 roku Aspdin opracował technologię sztucznego spoiwa, które nazwał cementem portlandzkim. Rok później wybudowano w Anglii pierwszą cementownię (Jamroży, 2009).

Proces produkcji cementu jest energochłonny i przyczynia się do emisji gazów cieplarnianych, co w znacznym stopniu odbija się na środowisku naturalnym. Warto podkreślić, iż tona wyprodukowanego klinkieru emituje do atmosfery tonę CO₂ (Gartner, 2004). Należy zauważyć, że w ostatnich dwóch latach nastąpił zauważalny wzrost światowego zużycia cementu. Ocenia się, że w 2012 roku światowe zużycie cementu osiągnęło poziom 3860 mln ton/rok (www.pbrz.pl), co w przeliczeniu na jednego mieszkańca Ziemi wynosi około 500 kg/rok. Wizja zmniejszających się zasobów naturalnych i wzrostów kosztów energii wymusza podjęcie działań, których korzyści będą odczuwalne w niedalekiej przyszłości. Dotyczyć one będą zmniejszania energochłonności produkcji cementu, wykorzystania odpadów przemysłowych oraz możliwie jak najszerzego stosowania recyklingu.

Kruszywo recyklingowe, w zależności od frakcji, zawiera w swoim składzie od 25-60% przylegającej zaprawy cementowej (Hansen i Narud, 1983). Im drobniejsze jest kruszywo, tym więcej zawiera

w swoim składzie zaprawy. Zaprawa ta jest materiałem porowatym, a jej porowatość zależy w głównej mierze od wskaźnika W/C betonu recyklingowego, z którego została otrzymana (Etxeberria i in., 2007). Liczne badania naukowe udowodniły, że stwardniała zaprawa recyklingowa ma szkodliwy wpływ na nowo projektowany beton – pogarsza urabialność mieszanki, obniża właściwości fizyczne i mechaniczne betonu. Natomiast Evangelista i de Brito (2007) stwierdzili, że stosowanie drobnego kruszywa recyklingowego jako substytutu drobnego kruszywa naturalnego w ilości nawet do 30% nie zagraża właściwościom mechanicznym betonu.

Należałoby więc podjąć działania badawcze mające na celu ponowne efektywne wykorzystania zaprawy recyklingowej jako wartościowego materiału wtórnego.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie właściwości mechanicznych zapraw cementowych z dodatkiem spoiwa recyklingowego, które stanowi częściowy substytut cementu.

2. Metodologia badań własnych

Przedmiotem badań były zaprawy cementowe z dodatkiem domielonej zaprawy recyklingowej jako częściowego substytutu cementu. Celem badań było określenie wpływu ilości dozowanej zaprawy recyklingowej oraz czasu jej domiata na właściwości fizyczne i mechaniczne zapraw cementowych.

Do badań użyto zaprawy uzyskanej w wyniku prażenia kruszywa recyklingowego. Prażenie kruszywa wtórnego wykonano w elektrycznym piecu ceramicznym w temperaturze 600°C i czasie 50 minut. Obróbka termiczna kruszywa miała na celu wywołanie procesu dehydratacji cementu, aby odnowić jego właściwości

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: maciej.swirydziuk@gmail.com

aktywizujące. W związku z tym, że kruszywo recyklingowe zawiera znaczne ilości zaprawy cementowej, zabieg ten pozwolił również na łatwiejsze odspojenie zaprawy od kruszywa grubego.

Do mechanicznego oddzielenia zaprawy od kruszywa wykorzystano bęben Los Angeles. Proces odspajania wykonano częściowo według PN-EN 1097-2 *Badanie mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Metody oznaczania odporności na rozdrabnianie*. W ten sposób uzyskano kruszywo wtórne o parametrach zbliżonych do kruszywa naturalnego oraz zaprawę recyklingową, która stanowiła zamiennik cementu w nowo projektowanych zaprawach. Tak uzyskany materiał został przesiany przez sito, w celu uzyskania frakcji 0/2 mm, a następnie poddany domieleniu w młynku planetarnym (rys. 1).

W celu prognozowania zmian wybranych właściwości mechanicznych zaprawy cementowej rozpisano dwuczynnikowy plan eksperymentu polisekcyjno-rotalno-quasi-uniformalny dla dwóch wielkości wejściowych, w którym liczba obiektów doświadczalnych $n = 10$ (...). Jest to jeden z planów centralnych, kompozycyjnych z dwukrotnym powtórzeniem doświadczenia w punkcie centralnym. Określa go ustalona liczba kombinacji wartości unormowanych, kodowanych wynoszących: 0, ± 1 , $\pm 1,414$. Zbiór wielkości wejściowych tworzą dwie zmienne niezależne na pięciu poziomach zmienności:

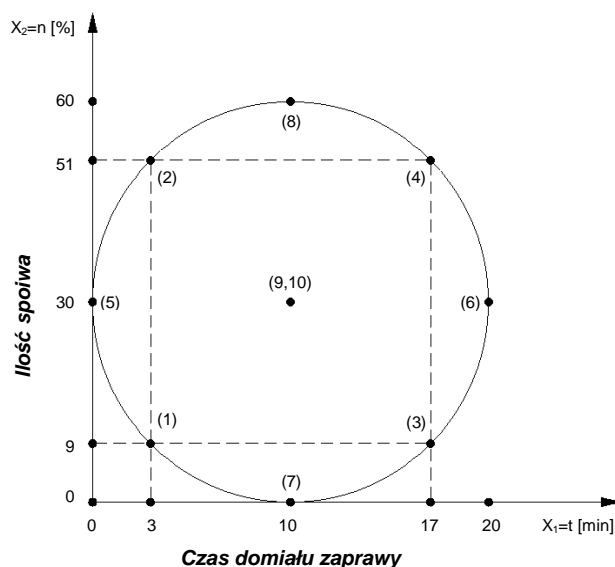
- X_1 – czas domiału zaprawy recyklingowej, który wynosił: 0, 3, 10, 17 i 20 [min],
- X_2 – dodatek spoiwa recyklingowego, jako zawartość procentowa masy cementu: 0, 9, 30, 51 i 60 [%].

Wartości kodowane zmiennych wejściowych przedstawiono w tabeli 1.

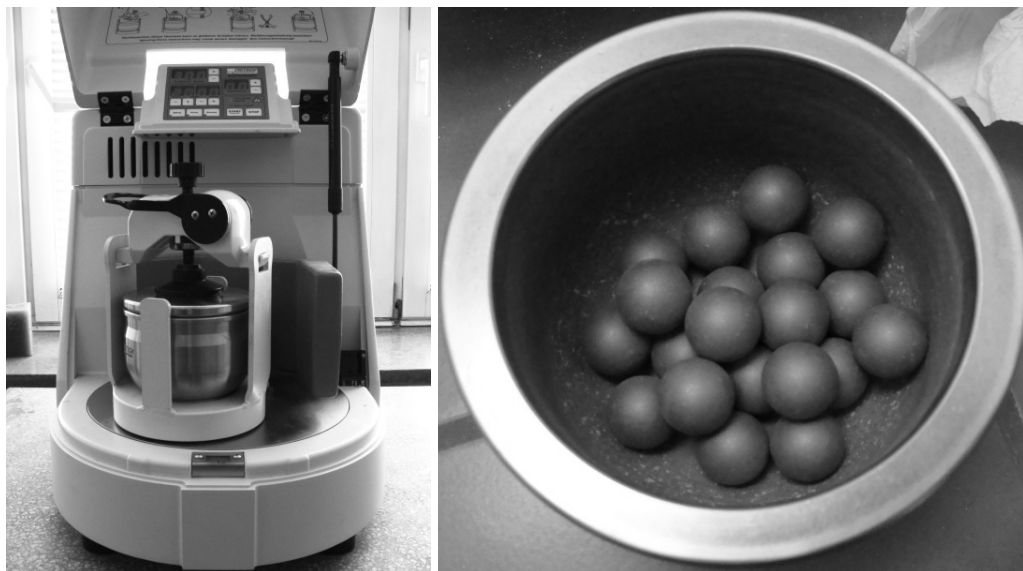
Tab. 1. Wartości kodowe zmiennych wejściowych eksperymentu

X_1 – czas domiału zaprawy recyklingowej		X_2 – dodatek spoiwa recyklingowego	
0 min	-1,414	0 %	-1,414
3 min	-1	9 %	-1
10 min	0	30 %	0
17 min	+1	51 %	+1
20 min	+1,414	60 %	+1,414

Układ punktów badawczych w przyjętym planie eksperymentu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Układ punktów badawczych według planu eksperymentu



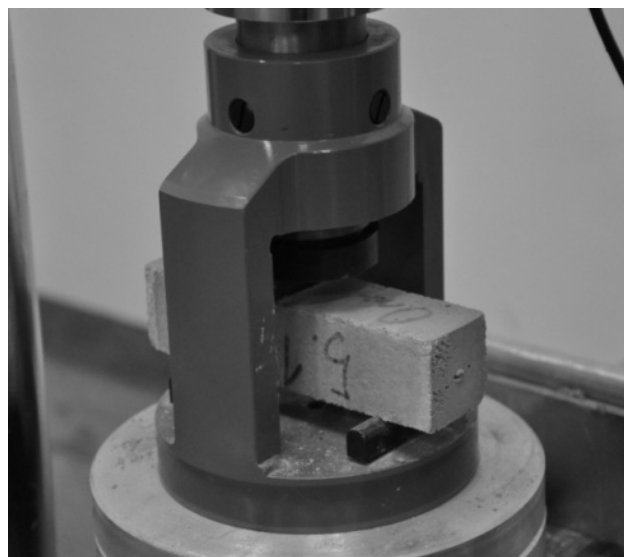
Rys. 1. Młynek planetarny

Funkcja obiektu została zapisana w postaci wielomianu drugiego stopnia:

$$z = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 \quad (1)$$

Próbki badawcze w postaci beleczek o wymiarach 4×4×16 cm wykonano zgodnie z normą PN-EN 196-1:2006 *Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości*. Przyjęto normową recepturę zaprawy w stosunku 0,5:1:3, to jest 225 g wody, 1350 g piasku oraz 450 g odpowiednio cementu lub cementu ze spoiwem recyklingowym. Do badań wykorzystano cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-M (V-LL) 32,5R oraz piasek normowy CEN PN-EN 196-1. Skład poszczególnych zapraw cementowych przedstawiono w tabeli 2.

Po 28 dniach dojrzewania beleczek przeprowadzono na nich badania właściwości mechanicznych, to jest wytrzymałość zaprawy na rozciąganie przy zginaniu (rys. 3) i ściskanie. Badania wytrzymałościowe wykonano za pomocą prasy hydraulicznej według PN-EN 196-1:2006. Wynik badania obliczono jako średnią arytmetyczną z trzech prób zginania oraz sześciu prób ściskania poszczególnych wyników uzyskanych podczas zginania i ściskanie każdej serii badanych próbek.



Rys. 3. Badanie wytrzymałości na zginanie w prasie hydraulicznej

3. Wyniki badań

Uzyskane wyniki badań wytrzymałości zapraw dla poszczególnych serii badawczych zamieszczono w tabeli 3.

Tab. 2. Skład badanych zapraw cementowych

Seria	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Czas domiału [min]	3	3	17	17	0	20	10	10	10	10
Dodatek spoiwa recykl. [%]	9	51	9	51	30	30	0	60	30	30
Woda [g]	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Piasek kwarc. [g]	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Ilość cementu [g]	409,5	220,5	409,5	220,5	315,0	315,0	450,0	180,0	315,0	315,0
Ilość zaprawy [g]	40,5	229,5	40,5	229,5	135,0	135,0	0,0	270,0	135,0	135,0

Tab. 3. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i zginanie

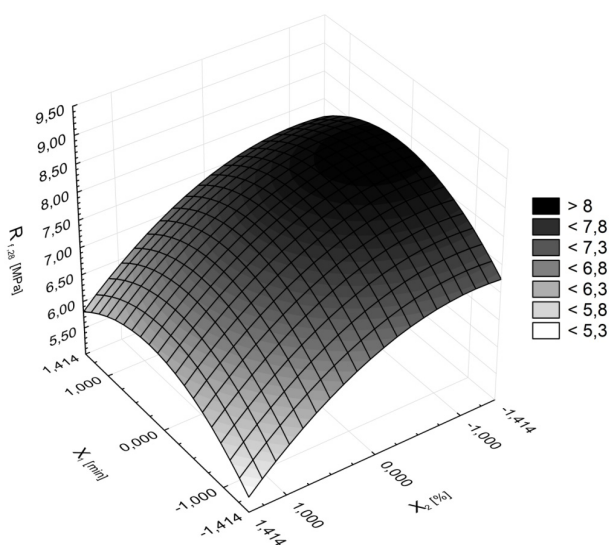
Seria	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Czas domiału [min]	3	3	17	17	0	20	10	10	10	10
Dodatek spoiwa recykl. [%]	9	51	9	51	30	30	0	60	30	30
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	7,2	6,6	7,5	7,0	7,0	7,5	9,0	6,0	7,5	8,3
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	55,2	26,8	41,1	28,0	36,4	37,6	57,0	21,9	42,0	42,3

3.1. Wytrzymałość zaprawy cementowej na zginanie

Na podstawie analizy statystycznej uzyskanych wyników badań przeprowadzonej w programie Statistica wyznaczono równanie regresji opisujące zmiany wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zaprawy cementowej po 28 dniach dojrzewania. Współczynnik determinacji modelu R^2 został oznaczony na poziomie 0,72. Interpretację graficzną obiektu badania dla wartości kodowanych rozpatrywanych czynników przedstawiono na rysunku 4.

$$R_{f,28} = 7,915 + 0,1686 \cdot x_1 - 0,6744 \cdot x_2 + 0,0125 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,4025 \cdot x_1^2 - 0,3050 \cdot x_2^2 \quad (2)$$

$$R^2 = 0,72$$



Rys. 4. Wytrzymałość zaprawy cementowej na zginanie $R_{f,28}$ [MPa] w zależności od czynników zmiennych X_1 – czas domiału zaprawy recyklingowej [min] oraz X_2 – dodatek spoiwa recyklingowego [%]

Na podstawie analizy równania regresji (2) stwierdzono, że dodatek spoiwa recyklingowego ma znaczący wpływ na zmianę wytrzymałości zaprawy na zginanie. Wraz ze wzrostem dodatku spoiwa recyklingowego maleje wytrzymałość zaprawy cementowej. Dodatek 60% spoiwa recyklingowego bez domiału spowodował spadek wytrzymałości zaprawy nawet o 32%. Natomiast wydłużenie czasu domiału dodatku spowodowało niewielki przyrost wytrzymałości zaprawy. Przy domiale spoiwa recyklingowego w czasie 10 min odnotowano wzrost wytrzymałości zaprawy rzędu około 19%.

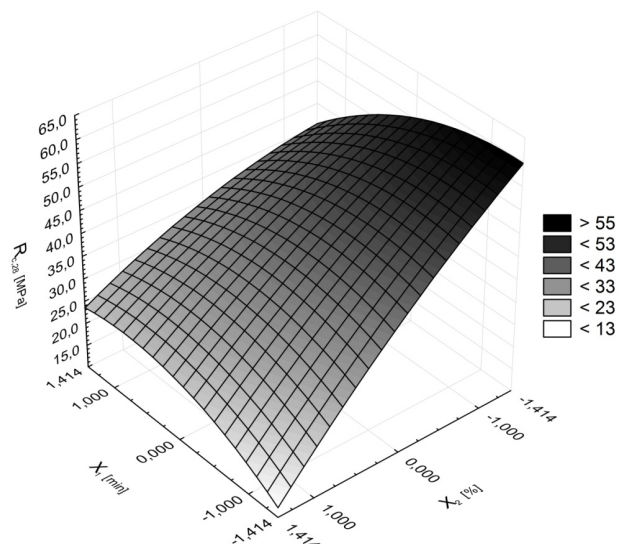
3.2. Wytrzymałość zaprawy cementowej na ściskanie

Na podstawie analizy statystycznej wyznaczono równanie regresji (3) opisujące zmiany wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej po 28 dniach dojrzewania. Współczynnik determinacji modelu R^2 został oznaczony na poziomie 0,97. Interpretację graficzną obiektu badania

dla wartości kodowanych rozpatrywanych czynników przedstawiono na rysunku 5.

$$R_{c,28} = 42,0 - 1,406 \cdot x_1 - 11,3931 \cdot x_2 + 3,825 \cdot x_1 \cdot x_2 - 2,6125 \cdot x_1^2 - 1,3875 \cdot x_2^2 \quad (3)$$

$$R^2 = 0,97$$



Rys. 5. Wytrzymałość zaprawy cementowej na ściskanie $R_{c,28}$ [MPa] w zależności od czynników zmiennych X_1 – czas domiału zaprawy recyklingowej [min] oraz X_2 – dodatek spoiwa recyklingowego [%]

Analizując rysunek 5 można wnioskować, że dodatek spoiwa recyklingowego w zaprawie ma decydujący wpływ na zmniejszenie jej wytrzymałości. Zależność ta jest wprost proporcjonalna. Im większa jest zawartość dodatku, tym większy jest spadek wytrzymałości zaprawy. Dodatek 60% spoiwa recyklingowego przy zerowym czasie domiału spowodował ponad dwukrotny spadek wytrzymałości materiału w porównaniu z zaprawą wzorcową, wykonaną na „czystym” cemencie. Niewielki wpływ na zmianę wytrzymałości wykazał czas domiału spoiwa recyklingowego przy mniejszych jego zawartościach w zaprawie. Natomiast wraz ze wzrostem substytutu cementu w materiale, rośnie istotność czasu domiału. Przy zawartości 60% i czasie domiału równym 20 minut, odnotowano wzrost wytrzymałości materiału sięgającą prawie 100%, w porównaniu z zerowym czasem jego domiału.

4. Wnioski

1. Wydłużenie czasu domiału spoiwa recyklingowego, dodanego do zaprawy jako substytutu cementu, zmniejszył spadek wytrzymałości na zginanie beleczek, który obliczono dla skrajnych zawartości dodatku 0% i 60%. Zawartość substytutu cementu w zaprawach powinna wynosić maksymalnie 30% masy, co już przy niewielkim czasie domiału daje dobry wynik wytrzymałości. Przy domiale spoiwa w czasie 3 minut spadek wytrzymałości na zginanie wyniósł 5%, w porównaniu do zaprawy wzorcowej.

W przypadku badania wytrzymałości na ściskanie spadek ten jest większy i wynosi około 30%.

2. Należy dążyć do jak najwyższego czasu domiału zaprawy recyklingowej w celu poprawienia jej aktywności. Trzeba pamiętać, że stopień rozdrobnienia spoiwa jest czynnikiem decydującym o podstawowych właściwościach użytkowych produktu. Przed domiałem zaprawa recyklinowa musi być przesiana przez sito co najmniej 2 mm, aby usunąć jak najwięcej drobnego kruszywa.
3. Wyniki potwierdzają, że technologia odzysku spoiwa cementowego z zaprawy recyklingowej sprawdza się przy zachowaniu odpowiednich parametrów oraz rozsądnej zawartości wtórnego spoiwa.

Podsumowując, zastosowanie dodatku recyklingowego do produkcji betonu obniża koszty produkcji, koszty utylizacji odpadów oraz chroni środowisko naturalne. Sprawia to, że recykling materiałów budowlanych na całym świecie stale rozwija się i będzie znajdował zastosowanie na coraz szerszą skalę.

Należy kontynuować badania dotyczące domiału zaprawy recyklingowej celem uzyskania jak największej powierzchni właściwej. Należy również zbadać wytrzymałość beleczek po 90 dniach dojrzewania. Należy badać spoiwo recyklingowe pod kątem aktywności hydraulicznej i pucolanowej dodatku

Literatura

- Ettxeberria M., Vazquez E., Mari A., Barra M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and productions process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, 735-742.
- Evangelista L., de Brito J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem Concr Compos*, 29 (5), 397-401.
- Gartner E. (2004). Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cement. *Cement and Concrete Research*, 34, 1489-1498.
- Hansen T.C., Narud H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International – Design and Constructions*, 5/1983.
- Jamróży Z. (2009). Beton i jego technologie. PWN, Warszawa.

FURTHER USE OF CEMENT BINDER RECOVERED FROM RECYCLED MORTAR

Abstract: The paper presents the test results of possibilities of recovery a cement binder from recycled mortar. The cement binder was obtained by grinding roasted recycled mortar in the laboratory planetary mill. Ten compositions of the cement binder with different content of recycled material were designed. Then laboratory samples were prepared and tests of mechanical and physical properties were conducted. Test results posted in these publication show that partial replacement of cement for grind recycled mortar in the new designed cement mortars is possible.