

WPLYW STOSOWANIA DROBNEGO KRUSZYWA Z RECYKLINGU NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH

Edyta PAWLUCZUK*, Karolina KOZAK

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

Streszczenie: Praca dotyczy ustalenia wpływu stosowania drobnego kruszywa z recyklingu na wybrane właściwości kompozytów cementowych. Frakcję z recyklingu uzyskano w wyniku rozdrobnienia wcześniej przygotowanych do tego celu próbek laboratoryjnych z normowej zaprawy cementowej. Do zrealizowania badań zaplanowano pełny eksperyment obejmujący w sumie 11 serii, w którym zmiennymi były: zawartość drobnego kruszywa z recyklingu (0-60%) oraz temperatura jego prażenia (0-850°C). Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że drobne kruszywo z recyklingu generalnie negatywnie wpływa na badane właściwości kompozytów cementowych. Efekt ten może być jednak ograniczony poprzez zastosowanie obróbki termiczno-mechanicznej drobnej frakcji recyklingowej.

Słowa kluczowe: drobne kruszywo z recyklingu, kompozyty cementowe, właściwości fizyczno-mechaniczne, skurcz.

1. Wprowadzenie

Beton jest materiałem powszechnie stosowanym w przemyśle budowlanym z uwagi na jego liczne zalety, takie jak: stosunkowo niski koszt, dostępność składników, zdolność do wypełniania zróżnicowanych form, dobra odporność ogniowa czy wreszcie trwałość. Dodatkowo jeszcze beton może liczyć na drugie życie, co potwierdzają wyniki badań przedstawiane w licznych publikacjach (McNeil i Kang, 2013; Pawluczuk, 2011; Pedro i in., 2014; Silva i in., 2014). Recykling gruzu betonowego uzyskanego przy budowie czy rozbiórce obiektów jest rozwiązaniem wysoce ekologicznym, wpisującym się w zasadę zrównoważonego rozwoju. Norma PN-EN 206:2014 *Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność* określa wymagania i warunki stosowania kruszywa z recyklingu do betonu w zależności od klasy ekspozycji. Jednakże uwarunkowania te dotyczą wyłącznie grubych frakcji z recyklingu (>4 mm). Zwykle drobny materiał traktowany jest jako odpad z uwagi na wysoką zawartość w nim pyłów oraz zanieczyszczeń (Sánchez de Juan i Gutiérrez, 2009) i zwykle jest składowany. Generalnie obecność kruszywa z recyklingu powoduje pogorszenie wszystkich parametrów betonu, natomiast efekt ten może być ograniczony poprzez stosowanie piasku naturalnego w charakterze kruszywa drobnego (Khoshkenari i in., 2014; Zhao i in., 2015).

Założeniem niniejszego artykułu była poprawa właściwości drobnego kruszywa z recyklingu poprzez wcześniejsze jego wyprażenie w celu częściowego usunięcia z jego powierzchni zaczynu cementowego oraz

aktywacji pucolanowej produktów hydratacji cementu. Przedstawiono wyniki badań kruszywa oraz kompozytu cementowego przygotowanego z jego udziałem. W celu wyeliminowania wpływu ewentualnych zanieczyszczeń, kruszywo drobne do badań wykonano z zaprawy normowej rozkruszonej po 28 dniach dojrzewania.

2. Technologia odzysku drobnego kruszywa recyklingowego

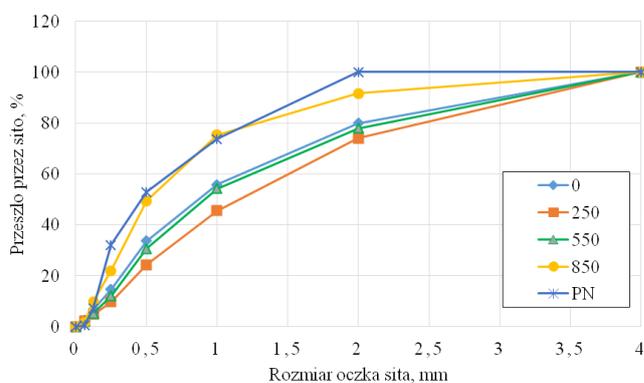
Do wykonania recyklingowej frakcji drobnej przygotowano próbki z zaprawy normowej zgodnie z normą PN-EN 196-1:2006 *Metody badania cementu. Część 1: Oznaczanie wytrzymałości*. Cement, który został użyty do wykonania próbek to cement portlandzki CEM I 42,5R. Belecзки dojrzewały przez 28 dni w wilgotnych warunkach, po czym ustalono ich wytrzymałość na zginanie i ściskanie oraz przetworzono na drobne kruszywo. W tabeli 1 przedstawiono średnie wyniki badania wytrzymałości na zginanie i ściskanie beleczek z zaprawy normowej.

Tab. 1. Średnie wyniki badania wytrzymałości na zginanie i ściskanie po 28 dniach dojrzewania

Belecзки z zaprawy normowej, 4×4×16 cm	Średnia wytrzymałość na zginanie [MPa]	Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa]
	6,82	37,11

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: e.pawluczuk@pb.edu.pl

Po zbadaniu wytrzymałości na ściskanie i zginanie powstały gruz skruszono wstępnie w szczękowej kruszarce laboratoryjnej LAB 02-130 do frakcji poniżej 16 mm. Po rozkruszeniu wstępnym materiał został wyprażony w piecu ceramicznym CT100EK w przewidzianych eksperymentem temperaturach odpowiednio: 250, 550 i 850°C. Prażenie gruzu z zaprawy cementowej miało na celu łatwiejsze usunięcie porowatego zaczynu cementowego z powierzchni ziaren piasku oraz przywrócenie aktywności pucolanowej pozostałym produktom hydratacji cementu. Po wyprażeniu kruszywo zostało domielone w młynku microDevala do frakcji 0/4 mm. Uzyskany materiał przepłukano na sicie 0,063 mm w celu usunięcia pyłów, wysuszono w temperaturze około 50°C i przeprowadzono stosowne badania. Na rysunku 1 przedstawiono przygotowane do badań kruszywa z recyklingu w zależności od temperatury ich prażenia. Można stwierdzić, że wraz ze wzrostem temperatury wzrasta również zawartość cząstek najdrobniejszych w kruszywie, co potwierdza również wykonana analiza sitowa poszczególnych materiałów (rys. 2).



Rys. 2. Krzywa uziarnienia piasku normowego (PN) i drobnych frakcji recyklingowych w zależności od temperatury prażenia

Wyniki badań gęstości nasypowej, gęstości objętościowej i nasiąkliwości frakcji recyklingowej i piasku normowego ustalone według PN-EN 1097-3:2000 *Badania mechaniczne i fizyczne właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości* i PN-EN 1097-6:2002 *Badania mechaniczne i fizyczne właściwości kruszyw. Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości* przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 1. Kruszywa z recyklingu stosowane do zapraw cementowych w zależności od temperatury prażenia

Tab. 2. Wyniki badań właściwości frakcji recyklingowej i piasku normowego

Cecha	Jednostka	Temperatura prażenia rozkruszonej zaprawy cementowej [°C]				Piasek normowy
		0	250	550	850	
Gęstość nasypowa	kg/dm ³	1,23	1,17	1,18	1,19	1,63
Gęstość objętościowa	kg/dm ³	-	-	-	2,49	2,71
Nasiąkliwość	%	-	-	-	10,3	1,35

Następnie wykonano analizę sitową zgodnie z normą PN-EN 933-1:2000/A1:2006 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania*. Do przeprowadzenia oznaczenia przygotowano po 300 g materiału z recyklingu wyprażonego w różnych temperaturach oraz nieprażonego. Materiał przygotowany do badania przesiewano za pomocą wstrząsarki automatycznej przez 10 minut. Wyniki analizy sitowej przedstawiono na rysunku 2.

W efekcie przeprowadzonych analiz sitowych stwierdzono obecność pyłów frakcji poniżej 0,063 mm, pomimo wcześniejszego odsiewania i płukania kruszywa. Może być to spowodowane uwalnianiem się w wodzie cząstek pyłów, a także oddzielaniem się zączynu od ziaren piasku w czasie suszenia lub też przy wstrząsach mechanicznych. Zaobserwowano również, że wraz ze wzrostem temperatury prażenia nastąpił wzrost zawartości frakcji drobnych, co świadczy o stopniowym rozluźnianiu wiązania w strefie kontaktowej między kruszywem a matrycą cementową i oddzielaniu się drobnych cząstek od powierzchni ziaren piasku.

3. Przygotowanie planu badań

3.1. Wybór zmiennych i opracowanie planu eksperymentu

W celu oceny jednoczesnego wpływu dwóch czynników na wybrane właściwości zaprawy cementowej z kruszywem recyklingowym dobrano następujące zmienne do badań:

- X_1 – zawartość drobnej frakcji z recyklingu 0,063/4,0 mm (20; 40; 60), % objętości piasku normowego
- X_2 – temperatura prażenia zaprawy cementowej (250; 550; 850), °C.

Eksperyment badawczy obejmuje w sumie 11 serii przedstawionych w tabeli 3. Seria nr 10 zawierała maksymalną stosowaną w tym eksperymencie zawartość frakcji drobnej z recyklingu (60%), która nie została poddana prażeniu. Seria nr 11 stanowiła serię kontrolną i zawierała 100% piasku normowego.

3.2. Zaprojektowanie składu kompozytu cementowego

Wszystkie serie zaprojektowano przy stałym współczynniku w_e/c i stałej objętości kruszywa. Współczynnik w_e/c przyjęto na poziomie 0,5. W związku z tym, że drobne kruszywo z recyklingu wykazuje wysoką nasiąkliwość (tab. 2), zdecydowano się dodać do zaprawy wodę dodatkową. Składy zapraw cementowych z różną zawartością drobnego kruszywa z recyklingu przedstawiono w tabeli 4.

Tab. 3. Plan eksperymentu badawczego

Seria	Zmienne rzeczywiste		Zmienne kodowane	
	X_1	X_2	x_1	x_2
	%	°C	-	-
1	20	250	-1	-1
2	40	250	0	-1
3	60	250	1	-1
4	20	550	-1	0
5	40	550	0	0
6	60	550	1	0
7	20	850	-1	1
8	40	850	0	1
9	60	850	1	1
10	60	0	frakcja recyklingowa nie prażona	
11	0	0	seria kontrolna	

Tab. 4. Zaprojektowany skład zaprawy cementowej z różnymi zawartościami drobnej frakcji z recyklingu

Składniki	jednostka	Zawartość drobnej frakcji z recyklingu, % objętości piasku normowego			
		0	20	40	60
CEM I 42,5R	g	450	450	450	450
w/c	-	0,5	0,5	0,5	0,5
Woda efektywna	ml	220,5	220,5	220,5	220,5
Woda dodatkowa	ml	0	18,7	37,5	56,2
Superplastyfikator	ml	4,5	4,5	4,5	4,5
Piasek normowy 0/2 mm	g	1350,0	1115,7	881,3	647,0
Fracja z recyklingu 0,063/4 mm	g	-	234,3	468,7	703,0

3.3. Przygotowanie próbek do badań

Zaprawę cementową wykonywano w automatycznej mieszarce laboratoryjnej. Na początku mieszano drobną frakcję z recyklingu z wodą dodatkową przez 0,5 minuty, następnie odczekano 3 minutach aby woda została wchłonięta przez kruszywo i ponownie mieszano przez 0,5 minuty. W dalszej kolejności dodano piasek normowy (mieszanie 1 minuta), potem dozowano cement (mieszanie 1 minuta), a na końcu wodę efektywną z superplastyfikatorem (mieszanie 3 minuty).

Po przygotowaniu zaprawy cementowej formowano beleczyki o wymiarach 40×40×160 mm, a także kostki o wymiarach 20×20×20 mm. Po rozformowaniu próbek umieszczono je w wannie z rusztem, pod którym znajdowała się woda w celu utrzymania wysokiej wilgotności. Po wymaganym okresie dojrzewania równym 28 dni przeprowadzono badania właściwości fizyczno-mechanicznych kompozytu cementowego.

4. Wykonanie badań i ich analiza

4.1. Skurcz kruszywa z recyklingu

Badanie skurczu drobnego kruszywa naturalnego i z recyklingu przeprowadzono na podstawie normy

PN-EN 1367-4:2010 *Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych. Część 4: Oznaczanie skurczu przy wysychaniu*. Do tego celu przygotowano beleczyki o wymiarach 200×50×50 mm z czopikami montowanymi na dwóch przeciwległych bokach form (rys. 3). Do badania wybrano serie z najwyższą zawartością kruszywa z recyklingu równą 60% przy różnych temperaturach prażenia (serie 3, 6, 9). Dla porównania wykonano badanie również próbek z kruszywem recyklingowym nieprażonym (seria 10) oraz kruszywem naturalnym (seria 11).

Badanie przeprowadzono za pomocą aparatu Graff-Kaufmana, a skurcz wyznaczono w procentach jako przeciętną zmianę długości beleczyków w stosunku do ich końcowych długości po wysuszeniu według wzoru (1):

$$S = \frac{(w-d)}{l} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: w jest pomiarem początkowy w stanie wilgotnym w mm; d jest pomiarem w stanie suchym w mm, a l jest długością beleczyki w stanie suchym w mm.



Rys. 3. Beleczyki do badania skurczu kruszywa

W tabeli 5 przedstawiono średnie wyniki skurczu badanych kruszyw recyklingowych w zależności od temperatury prażenia i kruszywa naturalnego (piasku normowego).

Tab. 5. Średnie wyniki skurczu badanych kruszyw drobnych

Numer serii	3	6	9	10	11
Średni skurcz [%]	2,70	5,44	5,22	6,88	2,33

Najmniejszy skurcz uzyskano w serii 11 przygotowanej na bazie piasku normowego. Natomiast obecność drobnego kruszywa z recyklingu wyraźnie zwiększa skurcz badanych próbek. Największą wartość skurczu uzyskano dla serii 10, w której dozowano drobne kruszywo z recyklingu nie poddane prażeniu. Najmniejszą zaś wartość skurczu kruszywa recyklingowego zaobserwowano w przypadku jego prażenia w temperaturze 250°C i jest ona tylko o około 16% wyższa w odniesieniu do piasku normowego. Należy przy tym zaznaczyć, że uzyskane średnie wartości znacznie odbiegają od tych, które są dopuszczone w przedmiotowej normie.

4.2. Właściwości świeżej i stwardniałej zaprawy cementowej

W tabeli 6 przedstawiono średnie wyniki badań świeżej zaprawy cementowej w postaci konsystencji mierzonej

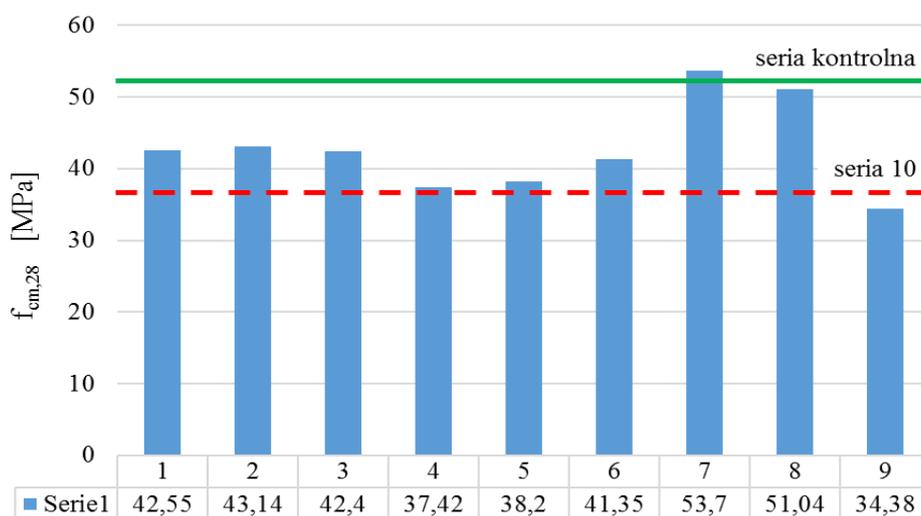
stolikiem rozplywu oraz gęstości, jak również stwardniałej zaprawy cementowej w zakresie wytrzymałości na ściskanie i zginanie oraz nasiąkliwości i gęstości pozornej.

We wszystkich badanych seriach uzyskano konsystencję ciekłą zaprawy cementowej (> 20 cm), co prawdopodobnie jest efektem dodania superplastyfikatora w ilości 1% masy cementu. Wpłynęło to również na obniżoną gęstość zarówno świeżej, jak i stwardniałej zaprawy cementowej. Na rysunku 4 i 5 przedstawiono zmiany odpowiednio wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania oraz nasiąkliwości kompozytów cementowych w zależności od zawartości drobnego kruszywa z recyklingu i temperatury jego prażenia oraz porównano wyniki z uzyskanymi dla kruszywa recyklingowego nieprażonego (seria 10) i piasku normowego (seria kontrolna 11).

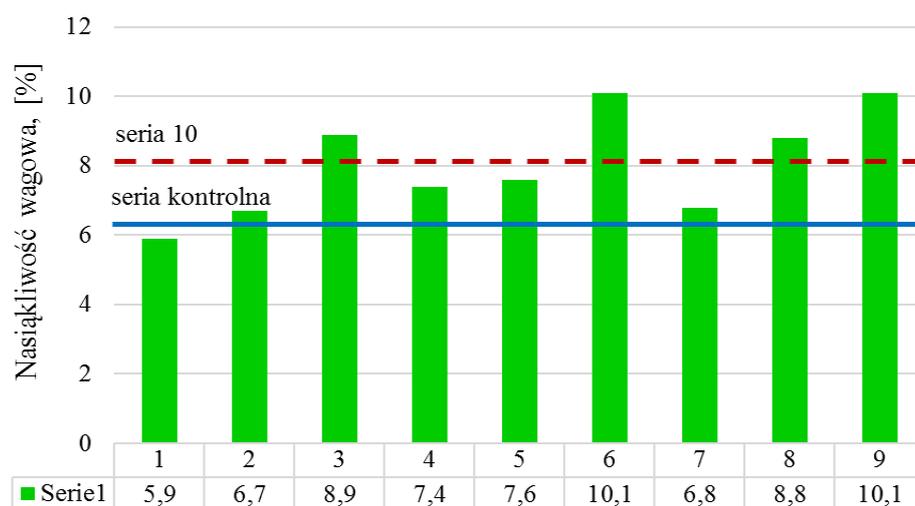
Dodatek drobnej frakcji recyklingowej spowodował obniżenie wytrzymałości na ściskanie kompozytów cementowych o około 28% (seria 10) w porównaniu z serią kontrolną. Jednakże proces prażenia kruszywa z recyklingu szczególnie w temperaturze 850°C istotnie poprawił właściwości wytrzymałościowe kompozytów cementowych przy jego zawartości do 40% masy piasku normowego. Korzystny wpływ odnotowano również przy prażeniu kruszywa w najniższej analizowanej temperaturze równej 250°C. Okazało się, że zabieg ten pozwolił na podniesienie wytrzymałości na ściskanie kompozytu o około 13% w porównaniu ze stosowaniem kruszywa nieprażonego (rys. 4).

Tab. 6. Średnie wyniki badań świeżej i stwardniałej zaprawy cementowej

Seria	Świeża zaprawa cementowa		Stwardniała zaprawa cementowa			
	Konsystencja	Gęstość	Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na zginanie	Nasiąkliwość wagowa	Gęstość pozorna
	cm	kg/dm ³	MPa	MPa	%	kg/dm ³
1	23,5	2,15	42,55	6,6	5,9	2,06
2	23,2	2,08	43,14	6,2	6,7	2,01
3	23,0	2,07	42,40	7,6	8,9	1,92
4	24,0	2,21	37,42	6,5	7,4	2,02
5	22,7	2,07	38,20	6,0	7,6	2,02
6	22,5	2,03	41,35	6,7	10,1	1,86
7	23,4	2,17	53,70	6,5	6,8	2,10
8	23,0	2,14	51,04	7,1	8,8	1,96
9	22,5	1,76	34,38	6,9	10,1	1,78
10	20,2	1,95	37,50	6,6	8,1	1,92
11	24,0	2,21	52,12	6,8	6,2	2,11



Rys. 4. Średnia wytrzymałość na ściskanie badanych kompozytów cementowych



Rys. 5. Średnia nasiąkliwość badanych kompozytów cementowych

Zastosowanie drobnego kruszywa z recyklingu w ilości 60% wpłynęło również na wzrost nasiąkliwości wagowej kompozytów cementowych o około 30%, w porównaniu z serią kontrolną. Zaobserwowano również, że prażenie kruszywa spowodowało zwiększenie nasiąkliwości kompozytu w porównaniu z dodatkiem kruszywa nieprażonego w ilości 60% (rys. 5). Zjawisko to potwierdzają uzyskane wyniki gęstości pozornej kompozytów cementowych. Proces prażenia spowodował rozpad produktów hydratacji cementu w kruszywie recyklingowym w wyniku ich odwodnienia, a przy wyższych temperaturach rzędu 850°C nastąpiła dodatkowo kalcynacja CaCO_3 na tlenek wapnia i dwutlenek węgla. Doprowadziło to do spadku gęstości materiału recyklingowego (gęstość nasypowa w tabeli 2), co przełożyło się na wzrost nasiąkliwości kompozytu. Procesy dehydratacji i kalcynacji doprowadziły do odzyskania częściowej aktywności pucolanowej produktów rozpadu, co wpłynęło na poprawę parametrów wytrzymałościowych w zakresie wytrzymałości na ściskanie i zginanie (tabela 6).

5. Podsumowanie

Celem niniejszej pracy było ustalenie wpływu stosowania drobnej frakcji z recyklingu 0,063/4 mm na wybrane właściwości kompozytów cementowych. Materiał ten uzyskano poprzez pokruszenie uprzednio wykonanych próbek badawczych z zaprawy cementowej o składzie normowym, odsianie frakcji mniejszej od 0,063 mm i wypłukanie w celu pozbycia się pyłów i ewentualnych zanieczyszczeń, a następnie wysuszenie. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- wraz ze wzrostem temperatury prażenia nastąpił wzrost zawartości pyłów w drobnej frakcji recyklingowej, co świadczy o stopniowym rozluźnianiu wiązania w strefie kontaktowej między kruszywem a matrycą cementową i oddzieleniu się drobnych cząstek od powierzchni ziarn piasku;
- wzrost zawartości frakcji z recyklingu spowodował nieznaczne pogorszenie konsystencji zaprawy cementowej oraz obniżenie jej gęstości; wynika to przede wszystkim z wysokiej nasiąkliwości i porowatości tego kruszywa;

- obecność drobnego kruszywa z recyklingu pogorszyła badane parametry kompozytu cementowego w porównaniu z serią kontrolną; przy maksymalnej zawartości frakcji recyklingowej zaobserwowano między innymi znaczny wzrost nasiąkliwości nawet o 60%, spadek gęstości o około 15% oraz obniżenie wytrzymałości na ściskanie o około 34% w porównaniu z kompozytem z piaskiem normowym; nie zaobserwowano natomiast istotnego wpływu na wartości wytrzymałości na zginanie w poszczególnych seriach;
- odsiewanie frakcji <0,063 mm i przepłukiwanie kruszywa zmniejszyło ilość pyłów, ale nie wyeliminowało ich całkowicie; kolejne pyły mogły się uwolnić w czasie przemywania kruszywa, gdyż obserwowano wypłukiwanie się cząstek zaczynu cementowego w czasie suszenia lub przy wstrząsach mechanicznych.

Wyniki potwierdzają, że obecność drobnej frakcji z recyklingu pogarsza parametry kompozytów cementowych, jednak stosowanie obróbki termiczno-mechanicznej już na poziomie 250°C może istotnie zniwelować ten niekorzystny wpływ.

Literatura

- Khoshkenari A.G., Shafiqh P., Moghimi M. Mahmud M.B. (2014). The role of 0-2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. *Materials and Design*, Vol. 64, 345-354.
- McNeil K., Kang T.H.-K. (2013). Recycled Concrete Aggregates: A Review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 7(1), 61-69.
- Pawluczuk E. (2011). Kształtowanie strefy kontaktowej kruszywo-zaczyn w betonach recyklingowych. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Vol. 2, No. 3, 369-376.

Pedro D., de Brito J., Evangelist L. (2014). Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: influence of the crushing process. *Materials and Structures*, Vol. 48 (12), 3965-3978.

Silva R. V., de Brito J., Dhir R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, Vol. 65, 201-217.

Sánchez de Juan M., Gutiérrez P.A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 2, 872-877.

Zhao Z., Remond S., Damidot D., Xu W. (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, Vol. 81, 179-186.

INFLUENCE OF USING FINE RECYCLED AGGREGATE ON SELECTED PROPERTIES OF CEMENT COMPOSITES

Abstract: The paper concerns the determination of the influence of using the fine recycled aggregates on selected properties of cement composites. Fine recycled aggregate was achieved as a result of crushing laboratory samples made of standardised cement mortar. To perform the test complete experiment consisting of 11 series was planned. Two different variables were: X_1 – content of fine recycled aggregate (0-60%) and X_2 – the temperature of mortar rubble roast (0-850°C). Based on the obtained results it was found that the fine recycled aggregate generally deteriorates the tested properties of cement composites. On the other hand this effect may be significantly limited by the use of thermal-mechanical treatment of recycled rubble.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy numer S/WBiŚ/1/16 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.