

OCENA ZASTOSOWANIA SPOIWA Z RECYKLINGU DO BETONÓW DROBNOZIARNISTYCH

Edyta PAWLUCZUK*, Katarzyna KALINOWSKA-WICHROWSKA

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

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących możliwości zastosowania materiału odpadowego w postaci spoiwa recyklingowego jako częściowego zamiennika cementu w betonach drobnoziarnistych. Spoiwo to uzyskano w procesie wieloetapowego rozdrabniania próbek laboratoryjnych wykonanych z zaprawy normowej. W zaplanowanym eksperymencie rozpatrywano wpływ trzech czynników na wybrane właściwości fizyczno-mechaniczne betonów. Czynnikiem tymi były: wiek spoiwa z recyklingu (1, 2, 3 miesiące), klasa cementu zastosowanego w spoiwie recyklingowym (32,5; 42,5; 52,5) oraz zawartość spoiwa recyklingowego (10, 20, 30% masy cementu). Badanymi wielkościami były: wytrzymałość na ściskanie betonu po 7, 28 i 90 dniach dojrzewania, nasiąkliwość oraz gęstość betonu. Na podstawie uzyskanych wyników badań ustalono, że w przyjętych zakresach zmienności czynników obecność spoiwa z recyklingu spowodowała znaczne pogorszenie parametrów betonu.

Słowa kluczowe: betony drobnoziarniste, spoiwo recyklingowe, właściwości fizyczno-mechaniczne betonów.

1. Wprowadzenie

Beton jest powszechnie stosowanym materiałem budowlanym, używanym od wieków. W związku z możliwościami wykorzystania go właściwie w każdej konstrukcji inżynierskiej, głównym problemem obecnych czasów jest powstawanie gruzu betonowego powstającego jako odpadu po remontach, demontażu i wyburzeniach obiektów budowlanych. Prace nad ponownym wykorzystaniem tych odpadów są prowadzone w USA i w Japonii od początku lat 70. minionego wieku. W krajach tych, w wyniku kataklizmów spowodowanych trzęsieniami ziemi, powstały olbrzymie ilości odpadu budowlanego, który trzeba było zagospodarować na miejscu. Znaczący udział ma tu gruz betonowy, który można zastosować do produkcji nowego betonu podczas rekonstrukcji zniszczonych obiektów. Już 15 lat temu w Japonii roczna ilość produkowanego gruzu betonowego wynosiła 35 milionów ton, a w Polsce 1,2 milionów ton. Wynika z tego, iż na jednego mieszkańca Polski, roczna ilość produkcji gruzu betonowego jest kilkakrotnie mniejsza niż w Japonii (Zajac i Gołębiowska, 2010). Ta różnica spowodowana jest nie tyle małą ilością odpadów betonowych produkowanych w Polsce, co ich pobieżną ewidencją. Poza tym, bezdyskusyjna konieczność ochrony naturalnych zasobów Ziemi, w tym głównie kruszyw oraz wysoka energochłonność procesu produkcji cementu nakładają na państwa potrzebę ponownego wykorzystywania raz użytego betonu. Szacuje się, że przemysł betonowy pochłania około 11 bilionów

ton kruszywa naturalnego w skali światowej (Grodzicka i in., 2002; Jin i Chen, 2015). Odpady budowlane stanowią około 25-30% wszystkich odpadów wytwarzanych w Unii Europejskiej i składają się z wielu materiałów, w tym, gruzu ceglanego, betonu, gipsu, itp., które można poddać procesowi odzysku (Zajac i Gołębiowska, 2014). Według zmienionej dyrektywy ramowej w sprawie odpadów (Dyrektywa 2008/98/EC), minimalny odsetek recyklingu odpadów „innych niż niebezpieczne” (CDW), powinien wynosić co najmniej 70% ich masy do 2020 roku, podczas gdy bieżący kurs średni recyklingu CDW dla UE-27 wynosi tylko 47% (Pacheco-Torgal i in., 2013; Lotfi i in., 2015, Zajac i Gołębiowska, 2014). W związku z globalnym użyciem betonu, stał się on drugim z najczęściej używanych materiałów (po wodzie). Według danych szacunkowych na całym świecie jest produkowanych nawet 25 miliardów ton betonu. Konsekwencją tego jest 510 milionów ton odpadów budowlanych generowanych w Europie, około 325 milionów ton w USA i około 77 milionów ton w Japonii (Ferrari i in. 2014). Przedstawione dane dotyczące ilości wytwarzanego betonu, finalnie – odpadu, skłaniają ku wnioskowi, iż skala problemu związana z wyczerpywaniem naturalnych surowców, wzrostem emisji CO₂ oraz samym zagospodarowaniem gruzu betonowego jest ogromna i należy podjąć wszelkie próby zapobiegania marnotrawstwu cennych materiałów odpadowych.

W literaturze można znaleźć wiele przykładów potwierdzających możliwość wykorzystania tak zwanych

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

grubych kruszyw recyklingowych do produkcji nowych betonów (Behera i in., 2014; Thomas i in. 2013). W opinii wielu badaczy drobne kruszywa recyklingowe istotnie wpływają na pogorszenie właściwości nowego betonu, w związku z czym nie zaleca się ich stosowania. Główną przyczyną takiego stanu jest obecność w ich składzie starej zaprawy cementowej i zanieczyszczeń (Duan i Poon, 2014). Jednak od kilku lat na świecie prowadzone są badania umożliwiające wykorzystanie drobnych frakcji recyklingowych do produkcji kompozytów cementowych. W badaniach tych stosowano różne ilości proszku recyklingowego ($< 63\mu\text{m}$), głównie do produkcji klinkieru, otrzymując obiecujące wyniki długoterminowe i zmniejszając o około 1/3 emisję CO_2 (Gastaldi i in., 2015; Schoon i in., 2015).

Celem podjętych w niniejszym artykule badań jest ustalenie możliwości ponownego wykorzystania spoiwa uzyskanego z recyklingu betonu jako zamiennika cementu w betonach drobnoziarnistych oraz wyznaczenie kierunku dalszych badań. Recepturę betonu drobnoziarnistego opracowano na podstawie składu betonu z proszków reaktywnych (tak zwane BPR), które to cechuje między innymi bardzo wysoka zawartość cementu w granicach $700\text{-}1200\text{ kg/m}^3$ oraz ograniczenie maksymalnego wymiaru ziaren $d \leq 600\mu\text{m}$ (Jasiczak i in., 2008; Aïtcin, 2000; Zdeb i Śliwiński, 2010).

2. Przedmiot i metodyka badań własnych

2.1. Charakterystyka surowców

Cement

Do badań stosowano trzy rodzaje cementów portlandzkich: CEM I 32,5R, CEM I 42,5R oraz CEM I 52,5R odpowiadające wymogom normy PN-EN 197-1 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku. W tabeli 1 przedstawiono średnie wyniki badań cementów wykorzystanych w badaniu.

Tab.1. Średnie wyniki badań cementów

Parametr	CEM I 32,5R	CEM I 42,5R	CEM I 52,5R
Początek wiązania [min]	182	180	180
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]:			
wczesna	24,1	30,1	34,0
normowa	49,5	54,4	66,4
Zmiana objętości [mm]	0,0	0,0	1,00
Straty prażenia [%]	2,95	3,04	1,05
Pozostałość nierozpuszczalna [%]	1,36	1,28	0,50
Zawartość siarczanów [%]	3,17	3,20	3,36
Zawartość chlorków [%]	0,08	0,08	0,012

Piasek

Do badań zastosowano kruszywo drobne w postaci piasku normowego, który do celów badania został domielony do frakcji $0,50\text{ mm}$, a następnie przesiany przez normowy zestaw sit. Na rysunku 1 przedstawiono rozkład wielkości ziaren domielonego piasku normowego.

Superplastyfikator

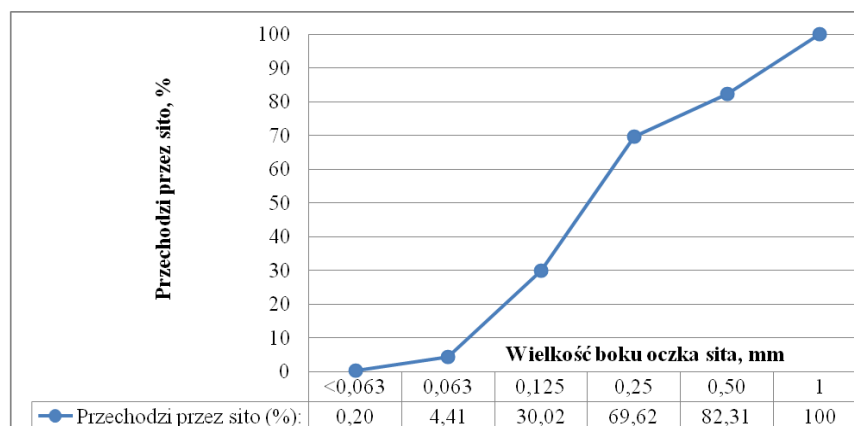
Zastosowano domieszkę CHRYSO Fluid Optima 350 wytwarzaną na bazie modyfikowanych polikarboksylianów znacznie redukującą ilość wody.

Pył krzemionkowy

Zastosowany do badań pył krzemionkowy pochodzi z Huty Łaziska S.A. Jego skład stanowią: SiO_2 – min. 85%, Fe_2O_3 – max. 2,5%, CaO – max. 1,0%, Al_2O_3 – max. 1,5%. Może on również zawierać niewielkie ilości krystalicznego kwarcu ($< 0,5\%$). Podstawowe właściwości fizyczno-chemiczne pyłu pokazano w tabeli 2.

Tab.2. Podstawowe właściwości fizyczno-chemiczne pyłu krzemionkowego

Wygląd	bardzo miękki amorficzny
Kolor	szary
Punkt topnienia [$^{\circ}\text{C}$]	1550-1570
Rozpuszczalność [w wodzie]	nierozpuszczalny / trudnorozpuszczalny
Ciężar właściwy [kg/dm^3]	2,2-2,3
Powierzchnia właściwa [m^2/g]	15-35
Zawartość cząstek powyżej $0,045\text{mm}$ [%]	max. 1,40



Rys. 1. Rozkład wielkości ziaren domielonego piasku normowego

Spoivo recyklingowe

Obecność zanieczyszczeń w „przemysłowym” spoiwie z recyklingu mogłaby zakłócić jednorodność uzyskanych wyników badań. W związku z tym, do eksperymentu przyjęto spoiwo uzyskane w wyniku przetworzenia wykonanych wcześniej próbek laboratoryjnych z zaprawy normowej, przygotowanej według normy PN-EN 196-1 *Metody badania cementu - Część 1: Oznaczanie wytrzymałości*. Do zaformowania beleczek 40×40×160 mm stosowano trzy rodzaje cementów portlandzkich: CEM I 32,5R, CEM I 42,5R oraz CEM I 52,5R. Po upływie ustalonego czasu (1, 2, 3 miesiące) próbki poddano badaniom wytrzymałości na zginanie i ściskanie. Wyniki badania przedstawiono w rozdziale 4.

Następnie wysuszone pozostałości beleczek po badaniu wytrzymałości wstępnie rozkruszono w laboratoryjnej kruszarce szczękowej, a potem domielano w bębnie micro Devala do uzyskania frakcji 0/0,063 mm.

Dla domielonego spoiwa recyklingowego określona została powierzchnia właściwa w aparacie Blaine’a wynosząca odpowiednio dla spoiwa na cemencie:

- CEM I 32,5R – 1,041 m²/g,
- CEM I 42,5R – 1,746 m²/g,
- CEM I 52,5R – 2,145 m²/g.

2.2. Zakres badawczy

Wytrzymałość na ściskanie

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na 6 losowo wybranych z każdej serii próbkach walcowych o średnicy 3 cm i wysokości 3,5 cm na podstawie normy PN-EN 12390-3 *Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*.

Nasiąkliwość

Badanie nasiąkliwości przeprowadzono na 4 losowo wybranych z każdej serii próbkach walcowych o średnicy 3 cm i wysokości 3,5 cm na podstawie normy PN-88/B-06250 *Beton zwykły*.

Gęstość betonu

Badanie gęstości betonu przeprowadzono na 4 losowo wybranych z każdej serii próbkach walcowych o średnicy 3 cm i wysokości 3,5 cm na podstawie normy PN-EN 12390-7 *Badania betonu - Część 7: Gęstość betonu*.

Powierzchnia właściwa spoiwa recyklingowego

Badanie powierzchni właściwej spoiw przeprowadzono aparatem Blaine’a według normy PN-EN 196-6 *Metody badania cementu - Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia*.

3. Eksperyment badawczy

3.1. Plan eksperymentu

W celu ustalenia wpływu obecności spoiwa z recyklingu na wybrane właściwości kompozytów cementowych zaplanowano eksperyment badawczy składający się z 12 serii podstawowych oraz serii dodatkowej (o numerze 13), która stanowiła serię kontrolną pozbawioną spoiwa recyklingowego. W eksperymencie uwzględniono trzy czynniki (X_1 , X_2 i X_3), o trzech poziomach zmienności każdy:

- X_1 – wiek spoiwa recyklingowego: 1, 2 i 3 miesiące,
- X_2 – klasa cementu w spoiwie recyklingowym CEM I: 32,5R; 42,5R i 52,5R,
- X_3 – procentowa zawartość spoiwa recyklingowego: 10%, 20% i 30% masy cementu.

Plan eksperymentu zawierający rzeczywiste i kodowane wartości zmiennych przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Plan eksperymentu badawczego

Seria	Wartości rzeczywiste			Wartości kodowane		
	X_1 [m-c]	X_2 [MPa]	X_3 [%]	x_1 [-]	x_2 [-]	x_3 [-]
1	1	52,5	20	-1	1	0
2	2	42,5	10	0	0	-1
3	3	52,5	10	1	1	-1
4	1	32,5	30	-1	-1	1
5	3	52,5	30	1	1	1
6	2	32,5	20	0	-1	0
7	1	52,5	30	-1	1	1
8	1	32,5	10	-1	-1	-1
9	3	32,5	30	1	-1	1
10	3	32,5	10	1	-1	-1
11	3	42,5	20	1	0	0
12	1	52,5	10	-1	1	-1
13	Seria kontrolna (bez spoiwa z recyklingu)					

3.2. Receptura mieszanki betonowej

Zawartość cementu w serii kontrolnej przyjęto równą 1000 kg/m^3 , jak dla betonów drobnoziarnistych z proszkami reaktywnymi. W celu ustalenia ilości poszczególnych składników betonów drobnoziarnistych wykonano próbne zaroby modyfikując współczynnik woda/cement w zakresie 0,25-0,30. Najkorzystniejszym, z punktu widzenia możliwości formowania i minimalnej ilości wyciskanej wody podczas prasowania próbek okazał się współczynnik $w/c = 0,28$, który przyjęto do projektowania składu mieszanki. W tabeli 4 przedstawiono ostateczne receptury mieszanki betonowej.

3.3. Wykonanie i pielęgnacja próbek

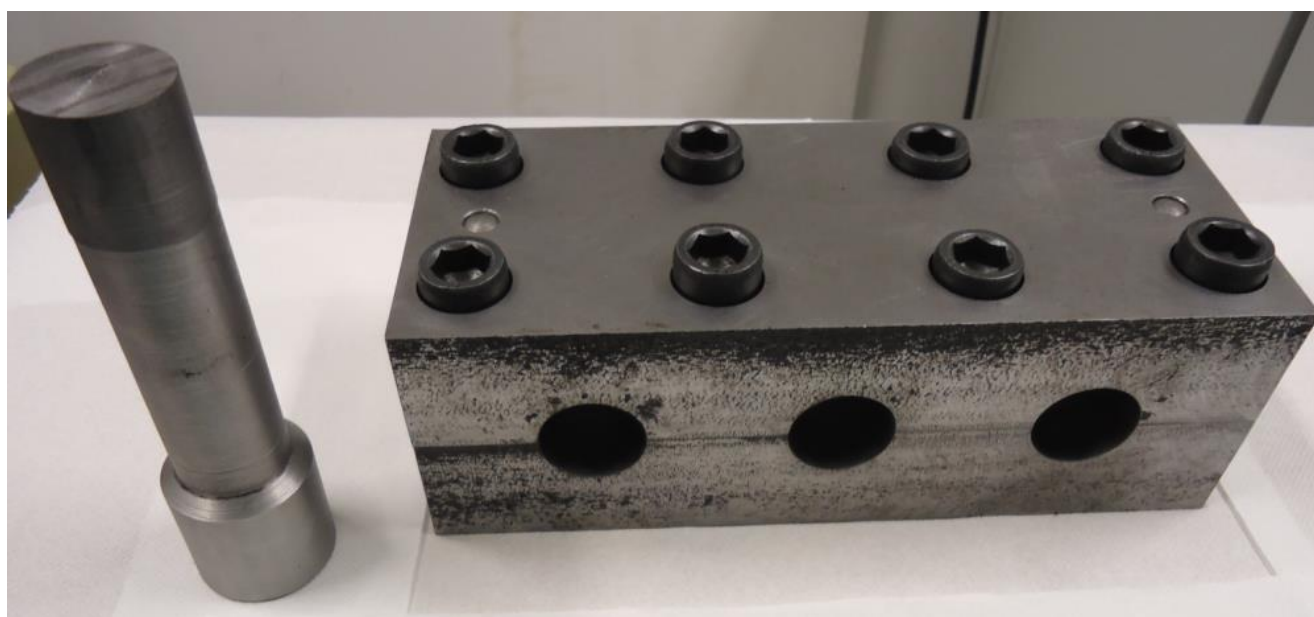
Wykonanie zarobów przeprowadzono przy użyciu automatycznej mieszarki laboratoryjnej. W pierwszej kolejności odważono i wymieszano składniki sykie przez 5 minut a następnie dodawano wodę połączoną

z superplastyfikatorem i mieszano przez kolejne 10 minut. Otrzymaną mieszankę dzielono na porcje o masie około 58 g. Tak przygotowaną ilość materiału umieszczano we wcześniej zaprojektowanej i wykonanej do tego celu formie stalowej umożliwiającej jednocześnie zaformowanie trzech próbek o średnicy 3 cm i wysokości 3,5 cm każda. Nienormowe wymiary próbek ustalono z powodu trudności w pozyskaniu wymaganych ilości spoiwa z recyklingu (frakcja do 0,063 mm). W celu prawidłowego zagęszczenia próbek, z uwagi na niski współczynnik w/s mieszanki betonowej równy 0,22, przyjęto metodę prasowania. Formę do wykonywania próbek przedstawiono na rysunku 2.

Następnie umieszczone w formie próbki poddawano prasowaniu przez okres 10 minut z siłą 250 kN. W trakcie prasowania zauważalne było wyciskanie nadmiaru wody z mieszanki. Po wyjęciu próbek z formy umieszczano je w basenie z wodą o temperaturze około 20°C do momentu przeprowadzenia stosownych badań.

Tab. 4. Receptury mieszanek betonowych na 1m^3

	Kontrolna	$X_3 = 10\%$	$X_3 = 20\%$	$X_3 = 30\%$
Cement CEM I 42,5 R [kg/m^3]	1000	900	800	700
Spoivo recyklingowe [kg/m^3]	0	100	200	300
Pył krzemionkowy [kg/m^3]	250	250	250	250
w/c	0,28	0,31	0,35	0,40
w/s	0,22	0,22	0,22	0,22
Woda [dm^3/m^3]	280	280	280	280
Superplastyfikator [dm^3/m^3]	25	25	25	25
Piasek normowy 0/0,50mm [kg/m^3]	685,8	685,8	685,8	685,8



Rys. 2. Forma do wykonywania próbek

4. Wyniki badań i dyskusja

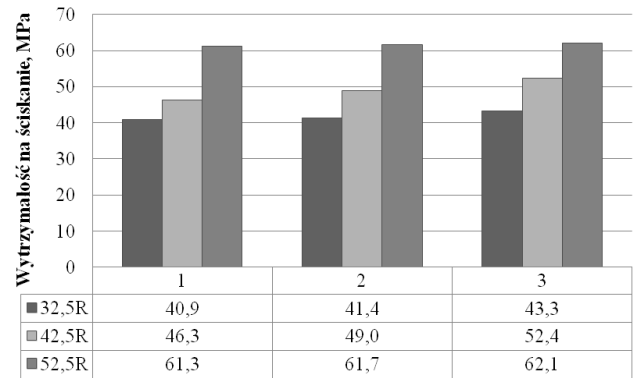
Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wyniki badań odpowiednio wytrzymałości na ściskanie i zginanie beleczek z zaprawy normowej zawierających różne klasy cementów i kruszonych po upływie odpowiednio 1, 2 i 3 miesięcy, stanowiących materiał do produkcji spoiwa z recyklingu. Wyniki te potwierdzają, że stosowanie wyższych klas cementu poprawia właściwości wytrzymałościowe zaprawy.

W tabeli 5 zamieszczono średnie wyniki badań betonów droбноziarnistych zawierających zmienne zawartości spoiwa recyklingowego wyprodukowanego z beleczek normowych przygotowanych z różnych klas cementów portlandzkich rozkruszanych w różnym wieku.

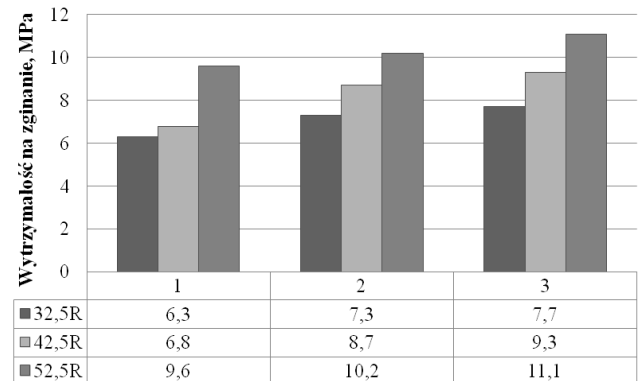
W celu ustalenia funkcji aproksymującej opisującej zmiany wybranych właściwości fizyczno-mechanicznych betonów droбноziarnistych, wyniki badań poddano analizie statystycznej, która obejmowała: analizę wariancji, obliczenie współczynników regresji oraz ocenę istotności współczynników regresji. Funkcję opisującą zmiany właściwości fizyczno-mechanicznych betonów z proszkami reaktywnymi przyjęto w postaci wielomianu drugiego stopnia:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (1)$$

W powyższym równaniu x_1 , x_2 i x_3 są kodowanymi (bezwymiarowymi) wartościami naturalnych czynników. Obliczenia przeprowadzono przy użyciu programu komputerowego Statistica wersja 10 oraz MS Excel.



Rys. 3. Średnie wyniki wytrzymałości na ściskanie beleczek na spoiwo z recyklingu w zależności od klasy cementu i wieku zaprawy w miesiącach



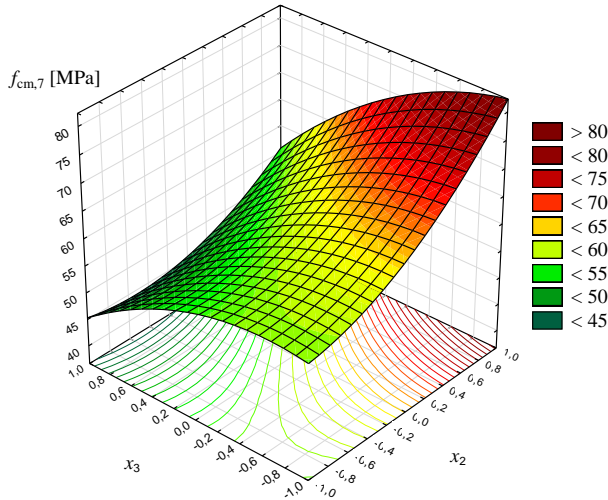
Rys. 4. Średnie wyniki wytrzymałości na zginanie beleczek na spoiwo z recyklingu w zależności od klasy cementu i wieku zaprawy w miesiącach

Tab. 5. Średnie wyniki badań betonów droбноziarnistych dla próbek walcowych o średnicy 3 cm i wysokości 3,5 cm

Seria	Średnia wytrzymałość na ściskanie po:			Średnia nasiąkliwość (N)	Średnia gęstość (D)
	7 dniach ($f_{cm,7}$)	28 dniach ($f_{cm,28}$)	90 dniach ($f_{cm,90}$)		
	[MPa]			[%]	[kg/m ³]
1	68,40	70,07	81,33	8,7	2127
2	61,53	80,33	85,57	7,3	2103
3	84,40	89,60	102,10	6,8	2120
4	52,57	68,83	75,70	9,7	2003
5	71,90	81,80	85,07	6,7	2090
6	66,77	84,40	86,07	8,9	2070
7	69,20	71,23	75,67	9,9	2075
8	65,80	76,63	80,40	7,9	2107
9	46,73	53,03	58,70	10,5	2010
10	54,70	60,10	81,93	8,2	2077
11	61,30	84,20	90,57	9,5	2037
12	67,20	90,07	94,53	7,9	2134
13	83,23	105,87	125,93	6,9	2140

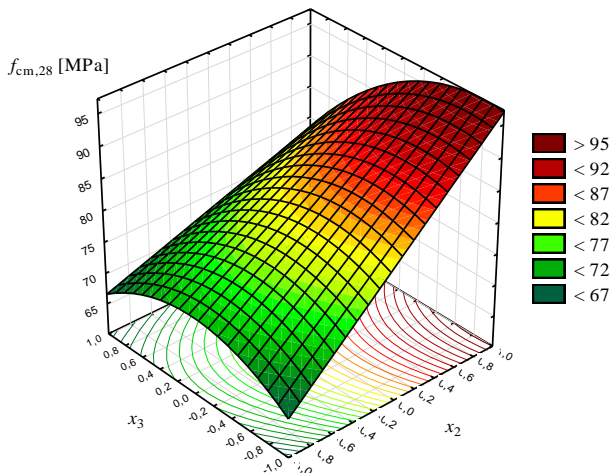
Na rysunkach 5-9 przedstawiono interpretację graficzną uzyskanych wyników badań w zależności od wartości zmiennych kodowanych x_2 (klasa cementu w spoiwie z recyklingu) oraz x_3 (zawartość spoiwa z recyklingu) przy stałej wartości $x_1 = 1$ (wiek spoiwa z recyklingu = 3 miesiące).

$$f_{cm,7} = 60,14 + 8,71x_2 - 9,77x_3 - 3,49x_2x_3 + 4,97x_2^2 - 4,82x_3^2 \quad R^2=0,93$$



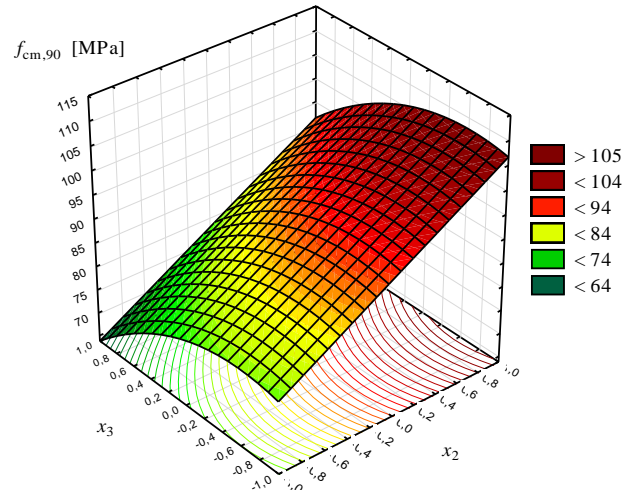
Rys. 5. Wpływ klasy cementu w spoiwie z recyklingu (x_2) oraz zawartości spoiwa z recyklingu (x_3) na wytrzymałość betonu na ściskanie po 7 dniach

$$f_{cm,28} = 82,94 + 10,66x_2 - 4,53x_3 - 4,71x_2x_3 - 5,90x_3^2 \quad R^2=0,80$$



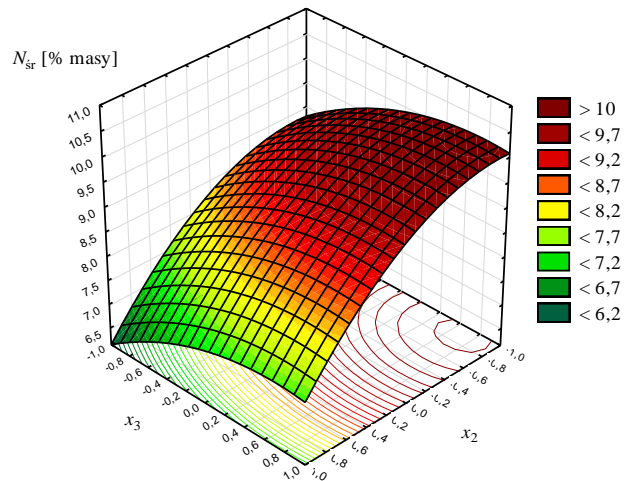
Rys. 6. Wpływ klasy cementu w spoiwie z recyklingu (x_2) oraz zawartości spoiwa z recyklingu (x_3) na wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach

$$f_{cm,90} = 91,56 + 13,89x_2 - 7,57x_3 - 6,30x_3^2 \quad R^2=0,88$$



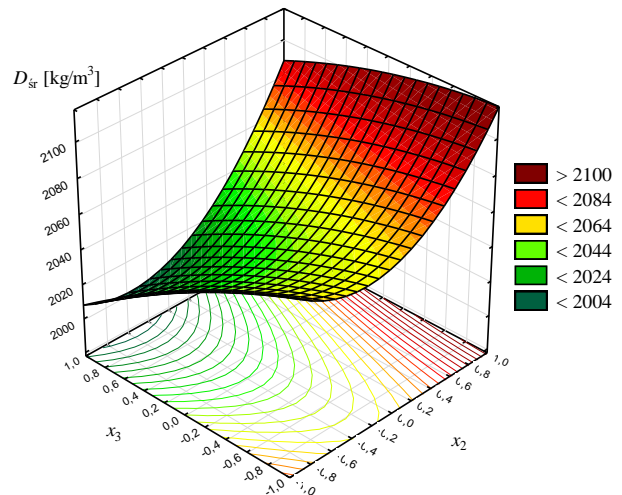
Rys. 7. Wpływ klasy cementu w spoiwie z recyklingu (x_2) oraz zawartości spoiwa z recyklingu (x_3) na wytrzymałość betonu na ściskanie po 90 dniach

$$N_{sr} = 9,30 - 1,33x_2 + 0,64x_3 - 0,74x_2^2 - 0,45x_3^2 \quad R^2=0,86$$



Rys. 8. Wpływ klasy cementu w spoiwie z recyklingu (x_2) oraz zawartości spoiwa z recyklingu (x_3) na nasiąkliwość betonu

$$D_{sr} = 2042,51 + 29,81x_2 - 24,93x_3 + 35,69x_2^2 - 5,31x_3^2 + 10,25x_2x_3 \quad R^2=0,95$$



Rys. 9. Wpływ klasy cementu w spoiwie z recyklingu (x_2) oraz zawartości spoiwa z recyklingu (x_3) na gęstość pozorną betonu

Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że wpływ czynnika x_1 , czyli wieku spoiwa recyklingowego, na analizowane właściwości betonu był statystycznie nieistotny bądź niewielki. Wynika to z faktu, że z uwagi między innymi na tempo badań rozpatrywano zbyt wąski przedział czasowy. Przyjęcie takiego wieku spoiwa z recyklingu, który pozwoliłby na niemal całkowitą hydratację cementu poprawiłoby właściwości tego materiału a co za tym idzie i jakość produktu finalnego. W każdej z badanych cech betonu zaobserwowano natomiast korzystny wpływ zastosowania wyższej klasy cementu w spoiwie recyklingowym. Użycie cementu CEM I 52,5R do produkcji spoiwa z recyklingu spowodowało wzrost wytrzymałości betonu zarówno po 7, 28, jak i 90 dniach dojrzewania średnio o 40% przy 10% zawartości spoiwa z recyklingu oraz średnio o 28% przy 30% jego zawartości w porównaniu z zastosowaniem cementu CEM I 32,5R. Zastosowanie wysokiej klasy cementu wpłynęło również znacząco na spadek nasiąkliwości betonu średnio o około 30%, natomiast zaobserwowano niewielki, bo tylko 3% wzrost jego gęstości. Wzrost zawartości spoiwa z recyklingu z 10% do 30% masy cementu spowodował znaczne obniżenie parametrów wytrzymałościowych betonu średnio o około 27% po 7 dniach dojrzewania i o około 17% po 90 dniach dojrzewania, przy czym wraz ze wzrostem klasy cementu w spoiwie straty te są mniejsze. Obecność spoiwa z recyklingu wpłynęła również na około 18% wzrost nasiąkliwości kompozytu i nieznaczny spadek jego gęstości rzędu 2%. W porównaniu z serią kontrolną wszystkie betony zawierające spoiwo z recyklingu wykazały pogorszenie analizowanych właściwości, natomiast straty te są mniejsze wraz ze wzrostem klasy cementu w tym spoiwie.

5. Podsumowanie

W procesie recyklingu konstrukcji betonowych uzyskuje się zwykle grube frakcje kruszywa > 4 mm stosowane, na przykład jako częściowy zamiennik kruszywa naturalnego w betonach oraz frakcje drobne do 4 mm, traktowane jako materiał odpadowy między innymi ze względu na ich wysoką nasiąkliwość i niską gęstość. W pracy podjęto próbę sprawdzenia możliwości zagospodarowania tego odpadu jako częściowego zamiennika cementu w betonach drobnziarnistych o zawartości cementu zbliżonej do betonów z proszków reaktywnych. Do tego celu przygotowano belecзки z zaprawy normowej zawierające różne klasy cementów CEM I, które rozdrabniano wieloetapowo po upływie 1, 2 i 3 miesięcy od zaformowania do uzyskania frakcji 0/0,063 mm. Następnie zaformowano próbki betonowe, w których zastępowano odpowiednio 10, 20 i 30% masy cementu uzyskanym spoiwem z recyklingu. W tym celu wykonano 11 serii badawczych zawierających również serię kontrolną pozbawioną spoiwa recyklingowego. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że w przyjętych zakresach zmienności czynników obecność spoiwa z recyklingu spowodowała znaczne

pogorszenie parametrów betonu. Zaobserwowano spadek wytrzymałości na ściskanie w granicach 30-49% wraz ze wzrostem zawartości spoiwa z recyklingu oraz wzrost nasiąkliwości nawet o 46% i około 6% spadek gęstości w porównaniu z betonem kontrolnym. Natomiast wpływ ten zmniejszał się istotnie wraz ze wzrostem klasy cementu obecnego w spoiwie recyklingowym. Tak więc wysoka jakość użytego materiału potwierdzona wytrzymałością na ściskanie i zginanie przekłada się bezpośrednio na właściwości produktu finalnego. Należy podkreślić, że jedyną stosowaną w badaniach metodą aktywacji spoiwa było jego domielanie do frakcji pyłowej, w związku z czym zdolności wiążące tego materiału były nieznaczne. Spełniał on raczej funkcję prawie obojętnego wypełniacza, a nie spoiwa. Kolejnym planowanym etapem badań będzie stosowanie wstępnego wyprażenia materiału recyklingowego w temperaturze umożliwiającej dehydratację cementu i przynajmniej częściowe przywrócenie mu zdolności wiążących. Wysoka nasiąkliwość betonu, pomimo poddania go prasowaniu z siłą 250 kN, wskazuje na konieczność poprawy gęstości upakowania cząstek.

Według szacunków drobne frakcje stanowią przynajmniej 30% betonowych materiałów odpadowych, dlatego też coraz częściej są przedmiotem zainteresowania badaczy, dążących do zagospodarowania tej znaczącej masy materiału do produkcji nowych kompozytów cementowych.

Literatura

- Aitcin P.C. (2000). Trwały wysokowartościowy beton – sztuka i wiedza. Beton na progu nowego milenium. *Polski Cement*, Kraków.
- Behera M., Bhattacharyya S.K., Minocha A.K., Deoliya R., Maiti S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, Vol. 68, 501-516.
- Duan Z.H., Poon C.S. (2014). Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials and Design*, Vol. 58, 19-29.
- Ferrari G., Miyamoto M., Ferrari A. (2014). New sustainable technology for recycling returned concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 67, 353-359.
- Gastaldi D., Canonico F., Capelli J., Buzzi L., Boccaleri E., Irico S. (2015). An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 61, 29-35.
- Grodzicka A., Siemaszko-Lotkowska D., Wolska-Kotańska Cz. (2002). Wybrane aspekty charakterystyki kruszyw pochodzących z recyklingu betonu i ich wykorzystanie. W: *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Budownictwo spełniające wymagania zrównoważonego rozwoju”*. Mrągowo, 141-150.
- Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T. (2008). Betony ultrawysokowartościowe – właściwości technologiczne, zastosowania. *Polski Cement*, Kraków.

- Jin R., Chen Q. (2015). Investigation of concrete recycling in the U.S. construction industry. *Procedia Engineering*, Vol. 118, 894-901.
- Lotfi S., Eggimann M., Wagner E., Mróz R., Deja J. (2015). Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. *Construction and Building Materials*, Vol. 95, 243-256.
- Pacheco-Torgal F., Tam V., Labrincha J., Ding Y., de Brito J. (2013). Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste. *Woodhead Publishing Limited*, Cambridge.
- Schoon J., Buysser K., Driessche I., Belie N. (2015). Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 58, 70-80.
- Thomas C., Setién J., Polanco J.A., Alaejos P., Sánchez de Juan M. (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 40, 1054-1065.
- Zajac B., Gołębiewska I. (2010). Ewolucja technologii recyklingu betonu. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, Vol. 49, Nr 5, 134-135.
- Zajac B., Gołębiewska I. (2014). Zagospodarowanie odpadów budowlanych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, Vol. 53, Nr 6, 393-395.
- Zdeb T., Śliwiński J. (2010). Beton z proszków reaktywnych – właściwości mechaniczne i mikrostruktura. *Budownictwo, Technologie, Architektura*, 3/2010, 51-55.

USE OF RECYCLED BINDER FOR PRODUCTION OF SMALL GRAIN SIZE CONCRETE

Abstract: The paper presents the results of research concerning the applicability of the recycled binder as a partial substitute of cement in the small grain size concrete. The binder is obtained in the process of multi-stage crushing of laboratory samples from the standard mortar. In the research experiment the influence of three factors on selected physical and mechanical properties of concrete was established. These factors were: age of recycled binder (1, 2, 3 months), a cement class used in recycled binder (32.5; 42.5; 52.5) and the recycled binder content (10, 20, 30% by cement mass). The tested properties were as follows: compressive strength of concrete after 7, 28 and 90 days of curing, water absorption, and density of the concrete. The research results indicate that in adopted ranges of factor variability the presence of recycled binder significantly deteriorated of concrete parameters, and therefore it is necessary to continue research using thermal treatment recycled material.