

dr hab. inż. Izabela Major, prof. PCz^{1*)}

ORCID: 0000-0003-1234-9317

dr inż. Izabela Adamczyk¹⁾

ORCID: 0000-0002-2880-4065

dr inż. Jacek Halbiniak¹⁾

ORCID: 0000-0002-2299-5913

Beton modyfikowany granulatem gumowym SBR i płatkami politereftalanu etylenu PET

Concrete modified with SBR rubber granules and polyethylene terephthalate PET flakes

DOI: 10.15199/33.2023.08.01

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę projektowania modyfikowanych mieszanek betonowych, które pozwoliły na zagospodarowanie materiałów pochodzących z recyklingu granulatu gumowego SBR oraz politereftalanu etylenu w postaci płatków PET. Wykonano podstawowe badania laboratoryjne dotyczące mieszanek betonowych oraz betonów kontrolnych i modyfikowanych dodatkami pochodzącymi z recyklingu w ilości 10, 12,5, 15% masy cementu. Wyniki badań betonów kontrolnych porównano z betonami modyfikowanymi i wykazano skuteczność opracowanego rozwiązania dotyczącego zagospodarowania materiałów odpadowych w mieszankach betonowych jako pełnowartościowych składników zastępujących kruszywa naturalne w betonach. Ma to duże znaczenie z uwagi na ochronę środowiska.

Słowa kluczowe: granulaty gumowe SBR; płatki politereftalanu etylenu PET; beton modyfikowany.

Abstract. The article presents a design method for modified concrete mixtures that allows for the use of recycled materials from SBR rubber granules and polyethylene terephthalate (PET) flakes. Basic laboratory tests were performed on concrete mixtures, control concrete and concrete modified with recycled additives at 10 wt%, 12.5 wt%, and 15 wt% of cement. The results of the control concrete tests were compared with those obtained for the modified concrete. The developed solution for managing waste materials in concrete mixtures as useful ingredients replacing natural aggregates in concrete was found to be feasible. This is of great importance for the protection of the environment.

Keywords: SBR rubber granules; PET polyethylene terephthalate flakes; modified concrete.

Spółczeństwa wysoko rozwinięte generują dużą ilość odpadów, wśród których dominuje tworzywo sztuczne pochodzące głównie ze zużytych opakowań. Istotnym problemem są również zużyte opony samochodowe. Omawiany w artykule granulaty gumowy SBR (*Styrene-Butadiene Rubber*) powstaje w wyniku przetworzenia zużytych opon samochodowych. Choć jest odpadem, stanowi cenne źródło pozyskania nowego materiału [1]. W budownictwie do produkcji betonu w większości stosuje się granulaty, miał i pył SBR jako zamienniki kruszywa. Autorzy [1] zastępowali kruszywo w mieszankach betonowych przerobionym odpadem ze zużytych opon samochodowych w postaci granulatu gumowego SBR, w ilości 2,5 ÷ 20% co 2,5% masy cementu, jednocześnie ujmując taką samą objętość kruszywa. W [2] autor badał betony z dodatkiem granulatu gumowego SBR w ilości: 5; 7,5; 10% masy cementu.

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji: izabela.major@pcz.pl

Stwierdził, że pomimo zmniejszania się wytrzymałości na ścislenie betonów z dodatkiem granulatu SBR, beton taki spełnia wymagania dotyczące betonów lekkich i wykazał, że „betony gumowe” zazwyczaj mają mniejszą masę jednostkową w stosunku do betonu kontrolnego. W [3] autorka badała beton z dodatkiem granulatu gumowego SBR o drobnych frakcjach 0 ÷ 2 mm w ilości: 10; 20; 30% masy cementu, zastępując nimi tylko piasek. Stwierdziła, że w odniesieniu do betonów kontrolnych następuje o 20 ÷ 33% spadek wytrzymałości na ścislenie w „betonach gumowych” oraz o ok. 13% zmniejszenie nasiąkliwości betonu. W [4] przedstawiono badania urabialności mieszanek betonowych, wytrzymałości na ścislenie i odporności na ścieranie betonów z dodatkiem granulatu gumowego SBR. Autorzy [4] wykazali, że dodatek granulatu gumowego SBR, jako zamiennika piasku, zmniejsza urabialność „gumowych mieszanek betonowych”.

Podstawowe właściwości politereftalanu etylenu to przede wszystkim bardzo duża odporność chemiczna, duża stabil-

ność kształtu, duża trwałość, sztywność, odporność na czynniki atmosferyczne, a także wytrzymałość mechaniczna i cieplna [5]. Przetworzony występuje w postaci płatków PET (*Poli (EtylenoTereftalanu)*) i granulatu PET. Badania nad wpływem dodatku w postaci PET, zarówno w formie płatków, jak i granulatu opisano w [6]. W mieszankach betonowych został on wykorzystany jako częściowy zamiennik kruszywa lub piasku. Wykazano, że niezależnie od zastosowanych form PET (granulaty lub płatki), wytrzymałość na ścislenie, zginanie i rozciąganie jest mniejsza w tak wykonanych betonach w stosunku do betonów kontrolnych. Jednak większa jest odporność na ścieranie betonu wykonanego z zastosowaniem PET.

W artykule przedstawiono próbę zagospodarowania granulatu gumowego SBR z przetworzenia zużytych opon samochodowych oraz politereftalanu etylenu w postaci kolorowych płatków PET pozyskanych ze zużytych opakowań spożywczych. Do badań zaprojektowano modyfikowaną mieszankę [7].

Materiały do projektowanych mieszanek betonowych

Do zaprojektowania i wykonania betonów zastosowano cement portlandzki CEM I 32,5R oraz piasek płukany 0 ÷ 2 mm i żwir 2 ÷ 8 mm. Do modyfikacji betonów wykorzystano granulaty gumowy SBR frakcji: 0 ÷ 1; 0,8 ÷ 2; 2 ÷ 4 mm i politereftalan etylenu w postaci kolorowych płatków PET. Do mieszanek betonowych dodano również domieszkę w postaci superplastyfikatora Stacheplast 202N. Właściwości fizyczne i chemiczne granulatu gumowego SBR użytego w badaniach przedstawiono w tabeli 1.

Wykonano analizę składu ziarnowego piasku i żwiru metodą przesiewania [9]. Punkt piaskowy piasku wyniósł $PP_p = 99,25\%$, a zawartość pyłów mineralnych $f = 0,25\%$. Skład ziarnowy piasku oraz żwiru użytego w badaniach oznaczono zgodnie z [9]. Punkt piaskowy żwiru stosowanego w badaniach wyniósł $PP_z = 25,2\%$.

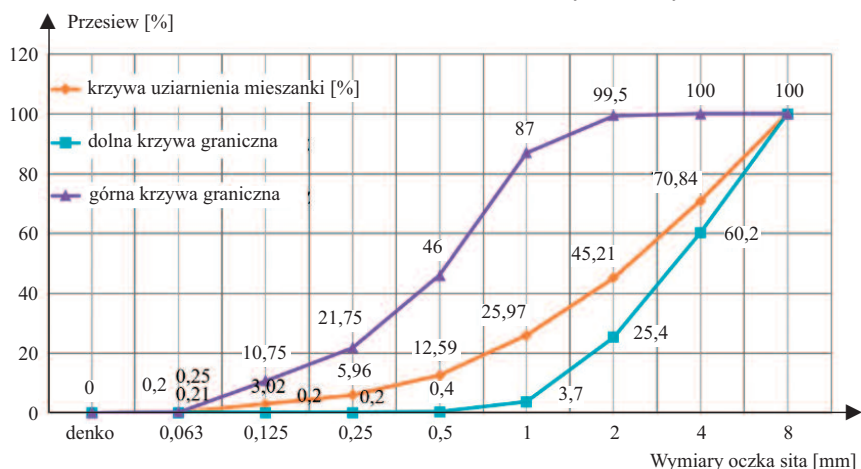
W celu skomponowania mieszanki kruszyw zastosowano metodę obliczeniową, w której przyjęta wartość punktu piaskowego mieszanki kruszyw $PP_M = 45\%$ umożliwia wyliczenie proporcji zmieszania piasku z kruszywem grubym. Oznacza to, że na 1 kg piasku należy użyć 2,74 kg żwiru. Skomponowana mieszanka kruszyw uzyskała wartość punktu piaskowego $PP_M = 45,21\%$.

Na podstawie wyliczonej zawartości procentowej poszczególnych frakcji skomponowanej mieszanki kruszyw wykreślono krzywą uziarnienia, która zmieściła się między krzywymi granicznymi (rysunek 1).

Tabela 1. Właściwości fizyczne i chemiczne granulatu gumowego SBR, zgodnie z [8]
Table 1. Physical and chemical properties of SBR rubber granules, according to [8]

Właściwość	Granulat gumowy SBR
Postać	granulat
Zapach	łagodny
Kolor	czarny
Gęstość	350 ÷ 700 kg/m ³
Rozpuszczalność	nie rozpuszcza się w wodzie
Temperatura zapłonu	> 350°C
Punkt zapłonu	> 350°C
Rozkład termiczny	> 180°C
Niebezpieczny rozkład/produkty	SO _x , NO _x , organiczne węglowodory, rozkład w temperaturze poniżej 800°C i w warunkach niedoboru tlenu – intensywne tworzenie sadzy

Właściwości piasku płukanego (0 ÷ 2 mm) oraz kruszywa żwirowego (2 ÷ 8 mm) użytych w mieszanekach betonowych przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 1. Krzywa uziarnienia skomponowanej mieszanki kruszyw do mieszanek betonowych
Fig. 1. Graining curve of the composed aggregate mix for concrete mixes

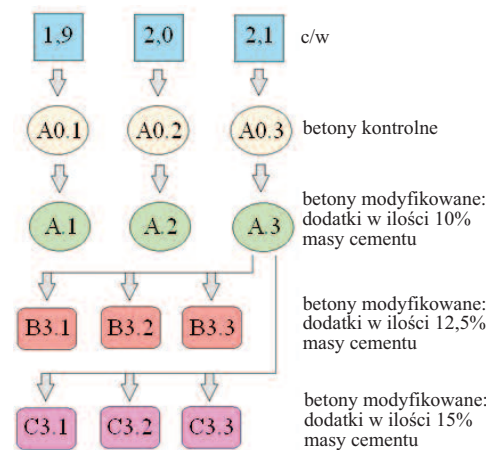
Tabela 2. Właściwości fizyczne i chemiczne piasku [10] oraz kruszywa grubego 2 ÷ 8 mm [11]
Table 2. Physical and chemical properties of sand [10] and 2 ÷ 8 mm coarse aggregate [11]

Badana cecha	Metoda badania	Dane producenta	Wynik badania autorskiego	Dane producenta	Wynik badania autorskiego
Zawartość pyłów mineralnych [%]	PN-EN 933-1 [9]	0,4	0,25	0,2	0,2
Wskaźnik płaskości [%]	PN-EN 933-3 [12]	–	–	5,8	5,78
Nasiąkliwość [%]		0,4	0,45	1,3	1,5
Gęstość ziaren wysuszonych w suszarce [Mg/m ³]	PN-EN 1097-6 [13]	2,63	2,64	2,6	2,58
Gęstość objętościowa ziaren [Mg/m ³]		2,66	2,65	2,69	2,65
Gęstość nasypowa [Mg/m ³]	PN-EN 1097-3 [14]	1,65	1,63	1,62	1,60

Program badań eksperymentalnych

Program badań eksperymentalnych obejmował modyfikację betonów kontrolnych dodatkami w postaci materiałów recyklingowych: płatków PET oraz granulatu gumowego SBR. Projekty betonów kontrolnych w przypadku trzech serii A0.1, A0.2, A0.3, wykonano metodą doświadczalną (Kuczyńskiego) – rysunek 2. Skład betonów kontrolnych przedstawiono w tabeli 3. Betony kontrolne serii A0.1-A0.3, różniące się stężeniem w/c, zmodyfikowano przez wprowadzenie dodatków recyklingowych w ilości 10% masy cementu, pozostawiając jednocześnie taką samą objętość piasku płukanego. W ten sposób uzyskano betony modyfikowane serii A.1, A.2, A.3, w których zastosowana mieszanka odpadów recyklingowych składa się z 36% granulatu gumowego SBR frakcji 0 ÷ 1 mm, 54%

granulatu gumowego SBR frakcji 0,8 ÷ 2 mm oraz 10% płatków PET. W celu zachowania warunku szczelności betonów modyfikowanych została doko-



Rys. 2. Schemat modyfikacji betonów
Fig. 2. Diagram of modification of concretes

nana korekta ilości piasku. Wyliczono objętość wprowadzonej mieszanki odpadów (granulat SBR + płatki PET) i jednocześnie odjęto taką samą objętość piasku.

Tabela 3. Skład betonów kontrolnych (A0.1-A0.3) oraz betonów modyfikowanych mieszaną dodatków recyklingowych: SBR i PET (A.1-A.3, B3.1-B3.3 i C3.1-C3.3) na 1 m³ mieszanki betonowej

Table 3. Compositions of control concrete (A0.1-A0.3) and concretes modified with a mixture of recycling additives: SBR and PET (A.1-A.3, B3.1-B3.3 and C3.1-C3.3) per volume of 1 m³ of concrete mix

Seria betonów	c/w	w/c	Cement CEM I 32,5R [kg/m ³]	Woda [l/m ³]	Piasek płukany [kg/m ³]	Żwir 2 ÷ 8 mm [kg/m ³]	Superplastyfikator Stacheplast 202N w ilości 1,2% masy cementu [l/m ³]	Udział dodatków w masie cementu [%]	Granulaty gumowe SBR [kg/m ³]			Płatki PET [kg/m ³]
									0 ÷ 1 mm	0,8 ÷ 2 mm	2 ÷ 4 mm	
A0.1	1,9	0,526	378	194,5	486	1300	4,54	-	-	-	-	
A0.2	2,0	0,5	402	196,2	492	1320	4,82	-	-	-	-	
A0.3	2,1	0,476	416	193,1	469	1256	4,99	-	-	-	-	
A.1	1,9	0,526	378	194,5	299	1300	4,54	10	13,61	20,41	-	3,78
A.2	2,0	0,5	402	196,2	291	1320	4,82	10	14,47	21,71	-	4,02
A.3	2,1	0,476	416	193,1	261	1256	4,99	10	14,98	22,46	-	4,16
B3.1	2,1	0,476	416	193,1	209	1256	4,99	12,5	18,72	28,08	-	5,2
B3.2	2,1	0,476	416	193,1	333	1129	4,99	12,5	4,68	14,04	28,08	5,2
B3.3	2,1	0,476	416	193,1	333	1129	4,99	12,5	9,36	9,36	28,08	5,2
C3.1	2,1	0,476	416	193,1	157	1256	4,99	15	22,47	33,69	-	6,24
C3.2	2,1	0,476	416	193,1	306	1107	4,99	15	5,65	16,85	33,69	6,24
C3.3	2,1	0,476	416	193,1	306	1107	4,99	15	11,23	11,23	33,69	6,24

Na podstawie przeprowadzonych badań wytrzymałości na ściskanie betonów kontrolnych A0.1-A0.3 oraz betonów modyfikowanych A.1-A.3, do dalszych badań i modyfikacji przyjęto beton serii A.3, w przypadku którego uzyskano najmniejszy spadek średniej wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości betonu bez dodatków recyklingowych. Pozwoliło to na uzyskanie kolejnych modyfikowanych serii betonów: B3.1; B3.2; B3.3 oraz C3.1; C3.2; C3.3.

W betonach B3.1-B3.3 zastosowano odpady recyklingowe w ilości 12,5% masy cementu. Zawartość procentowa poszczególnych dodatków była identyczna jak w przypadku betonu A3. Natomiast w betonach C3.1-C3.3 zastosowano materiały recyklingowe w ilości 15% masy cementu. Ich zawartość procentowa była również identyczna jak w przypadku betonu A.3 i B3.1.

Procentową zawartość granulatu gumowego SBR oraz płatków PET w poszczególnych seriach betonów modyfikowanych B3.1-B3.3 oraz C3.1-C3.3 przedstawiono w tabeli 4.

Metody badań

Badania umożliwiły dokonanie analizy wpływu zastosowanych odpadów recyklingowych na wybrane cechy mieszanek betonowych i betonów, tak jak ma to miejsce w [15, 16]. W przypadku

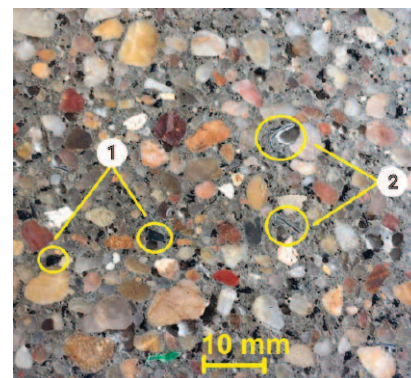
wszystkich zaprojektowanych mieszanek betonowych betonów kontrolnych i modyfikowanych przeprowadzono badanie konsystencji mieszanki betonowej metodą stożka opadowego, zgodnie z normą [17]. Badanie wytrzymałości na ściskanie serii betonów wykonano zgodnie z normą [18], przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Toni Technik ZWICK typu 2030. Czas pielęgnacji wynosił 7, 14 i 28 dni. Wybrano stałą prędkość obciążenia próbek 1,0 MPa/s. Przekrój próbki modyfikowanego betonu przedstawiono na fotografii.

W przypadku serii betonów modyfikowanych B i C oraz betonu kontrolnego serii A0.3 **przeprowadzono badania: głębokości penetracji wody, nasiąkliwości, gęstości betonu, mrozoodporności.** Badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wykonano zgodnie z normą [19]. W badaniu określono wpływ działania wody pod ciśnieniem

Tabela 4. Procentowy udział granulatów gumowych SBR oraz płatków PET w modyfikowanych betonach B3.1-B3.3 oraz C3.1-C3.3

Table 4. Percentage of SBR rubber granules and PET flakes used in modified concrete of series B3.1-B3.3 and C3.1-C3.3

Dodatki z odpadów recyklingowych	Ilość [%]	Zawartość odpadów w betonach modyfikowanych					
		12,5% masy cementu			15% masy cementu		
		B3.1	B3.2	B3.3	C3.1	C3.2	C3.3
Granulat gumowy 0 ÷ 1 [mm]	90	36%	9%	18%	36%	9%	18%
Granulat gumowy 0,8 ÷ 2 [mm]		54%	27%	18%	54%	27%	18%
Granulat gumowy 2 ÷ 4 [mm]		-	54%	54%	-	54%	54%
Płatki PET	10	10%					



Przekrój próbki betonu modyfikowanego: 1 – granulaty gumowe SBR o frakcji 2 ÷ 4 mm; 2 – płatki PET

Cross-section of a modified concrete sample: 1 – SBR rubber granules with a fraction of 2 ÷ 4 mm; 2 – PET flakes

5 barów na powierzchnię próbki betonowej przez 72 h. Badanie nasiąkliwości betonów modyfikowanych B3.1-B3.3 i C3.1-C3.3 oraz betonu kontrolnego serii A0.3 przeprowadzono zgodnie z normą [20], badanie gęstości objętościowej betonów na podstawie normy [21], a badanie mrozoodporności wg normy [22].

Wyniki badań i dyskusja

Wyniki badań zaprojektowanych mieszanek betonowych betonów kontrolnych i modyfikowanych, po badaniu **konsystencji mieszanki betonowej** metodą stożka opadowego, przedstawiono w tabeli 5. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wszystkie serie mieszanek betonowych kontrolnych uzyskały klasę konsystencji S1. Serie mieszanek betonowych modyfikowanych A.1, A.2, C3.3 uzyskały klasę konsystencji mieszanki betonowej S1/S2, a pozostałe serie mieszanek betonowych modyfikowanych klasę konsystencji S2. Zastosowanie odpadów recyklingowych spowodowało zwiększenie ciekłości badanych mieszanek betonowych.

Tabela 5. Wyniki badań serii betonów kontrolnych A0.1-A0.3 oraz betonów modyfikowanych odpadami recyklingowymi A.1-A.3, B3.1-B3.3 oraz C3.1-C3.3
Table 5. Test results for a series of control concretes A0.1-A0.3 and concretes modified with recycling waste A.1-A.3, B3.1-B3.3 and C3.1-C3.3

Rodzaj badania/seria betonów		Konsystencja mieszanki betonowej		Wytrzymałość na ściskanie			
		opad stożka [mm]	klasa konsystencji	średnia wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]			klasa wytrzymałości betonu
				po 7 dniach	po 14 dniach	po 28 dniach	
Betony kontrolne	A0.1	38	S1	41,2	42,3	46,7	C30/37
	A0.2	35	S1	42,5	44,7	49,6	C35/45
	A0.3	40	S1	44,0	49,1	53,6	C35/45
Betony modyfikowane – dodatki	10% masy cementu	A.1	S1/S2	27,2	31,6	36,3	C25/30
		A.2	S1/S2	34,4	37,0	40,4	C25/30
		A.3	S2	36,9	40,1	45,7	C30/37
	12,5% masy cementu	B3.1	S2	30,7	35,6	38,8	C25/30
		B3.2	S2	35,0	38,1	39,4	C25/30
		B3.3	S2	36,0	38,7	42,8	C25/30
	15% masy cementu	C3.1	S2	27,0	32,4	37,7	C25/30
		C3.2	S2	31,2	36,1	39,2	C25/30
		C3.3	S1/S2	34,0	37,5	39,8	C25/30

W badaniu **wytrzymałości na ściskanie betonów** (rysunek 3) uzyskano średnie wartości wytrzymałości oraz odpowiadające im klasy wytrzymałości. Średnią wartość wytrzymałości na ściskanie betonów (tabela 5) kontrolnych i modyfikowanych po 7, 14 i 28 dniach dojrzewania przedstawiono również na rysunku 3. Wykazano, że średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 7 dniach w przypadku mieszanek serii C stanowi ok. 90,51% średniej wytrzymałości betonu na ściskanie mieszanek serii B. Po 14 dniach otrzymano wartość ok. 94,22%, a po 28 dniach – ok. 96,55%, przy czym w przypadku betonu C3.1 jest to 97,16%, betonu C3.2 – 99,49%, natomiast betonu C3.3 – 92,99%. Badanie mrozoodporności po 25 cyklach zamra-

żania i rozmrażania wykazało, że wartość wytrzymałości betonu C3.1 na ściskanie zmniejszyła się o 14,28% w porównaniu z B3.1, betonu C3.2 o 12,76% – w stosunku do B3.2, a betonu C3.3 o 12,5% w stosunku do B3.3. W przypadku 100 cykli zamrażania i rozmrażania wartość wytrzymałości betonu C3.1 na ściskanie zmniejszyła się o 3,89% w stosunku do B3.1, betonu C3.2 – o 7,95% w stosunku do B3.2, natomiast betonu C3.3 zwiększyła się o 0,63% w stosunku do B3.3 (tabela 6).

Wyniki pomiarów **głębokości penetracji wody** pod ciśnieniem zamieszczono w tabeli 6. Na podstawie przeprowadzonego badania stwierdzono, że najmniejszą głębokość penetracji wody uzyskano w przypadku betonu kontrol-

nego serii A0.3. Jej wartość wyniosła 49 mm. Maksymalna głębokość penetracji wody pod ciśnieniem betonów modyfikowanych serii B3.1 i C3.1 wyniosła odpowiednio 102 i 118 mm. Betony z dodatkiem odpadów recyklingowych uzyskały większą wartość głębokości penetracji wody w porównaniu z betonem kontrolnym.

Na podstawie omawianego badania stwierdzono, że wprowadzenie frakcji granulatu gumowego SBR 2 ÷ 4 mm spowodowało uzyskanie wartości maksymalnych głębokości penetracji wody (mniejszych w przypadku serii betonów B3.2, B3.3, C3.2 i C3.3 w porównaniu z betonem serii B3.1 i C3.1.).

Średnie wartości **nasiąkliwości wodą** betonów modyfikowanych B3.1-B3.3 i C3.1-C3.3 oraz betonu kontrolnego serii A0.3 przedstawiono w tabeli 6. Betony, w których zastosowano odpady recyklingowe w ilości 12,5% masy cementu (serie B) oraz w ilości 15% masy cementu (serie C), uzyskały średnią nasiąkliwość mniejszą w porównaniu z betonem kontrolnym serii A0.3. Wprowadzenie do serii betonów modyfikowanych B3.1-B3.3 i C3.1-C3.3 dodatków w postaci mieszanki odpadów recyklingowych granulatu SBR oraz płatków PET spowodowało uzyskanie średniej nasiąkliwości mniejszej w porównaniu z betonem kontrolnym serii A0.3. Właściwości granulatu gumowego, takie jak brak porów, niewchłanianie wody, spowodowały zmniejszenie wartości nasiąkliwości betonów modyfikowanych.

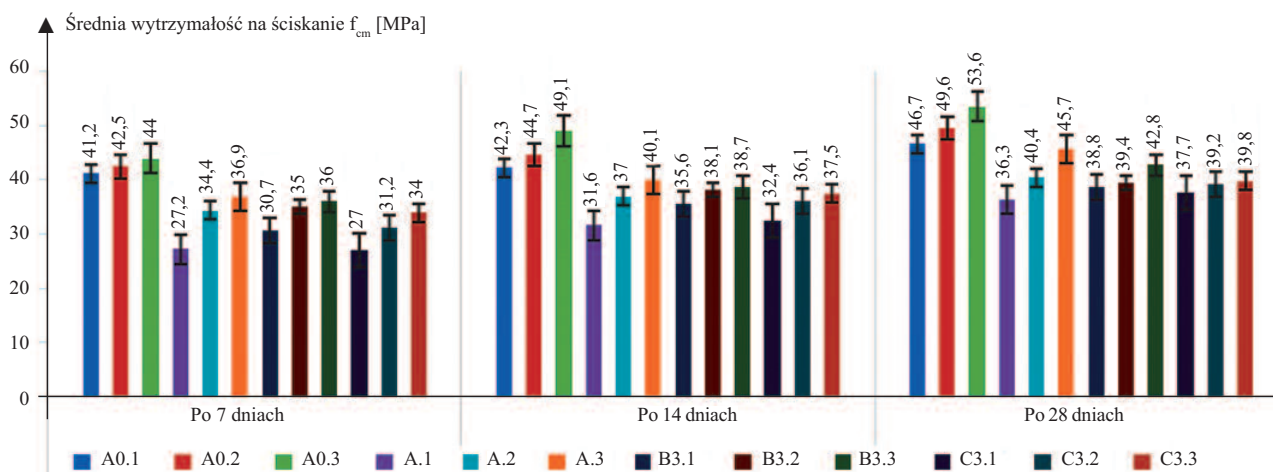

Rys. 3. Średnia wartość wytrzymałości na ściskanie betonów kontrolnych i modyfikowanych po 7, 14 i 28 dniach
Fig. 3. Average compressive strength values of control and modified concretes after 7, 14 and 28 days

Tabela 6. Wyniki badań serii betonu kontrolnego A0.3 oraz betonów modyfikowanych odpadami recyklingowymi serii B i C
Table 6. Test results for the A0.3 control concrete series and concretes modified with recycled waste of the B and C series

Serie betonów/ rodzaj badania	Beton kontrolny	Betony modyfikowane						
		12,5% masy cementu			15% masy cementu			
	A0.3	B3.1	B3.2	B3.3	C3.1	C3.2	C3.3	
Maksymalna głębokość penetracji wody pod ciśnieniem [mm]	49	102	78	80	118	87	85	
Średnia nasiąkliwość betonu n_w [%]	4,95	4,80	4,70	4,68	4,81	4,65	4,6	
Średnia gęstość objętościowa betonu D [kg/m ³] w stanie suchym	2252,4	2188,6	2201,2	2203,7	2163,6	2169,8	2197,3	
Klasa gęstości betonu		Beton zwykły						
Średni spadek wytrzymałości na ściskanie po cyklach zamrażania i rozmrażania ΔmF_i [%]	i = 25	7,9	4,9	4,7	4,0	4,2	4,1	3,5
	i = 100	18,8	18,0	17,6	15,8	17,3	16,2	15,9

Średnią gęstość objętościową badanych betonów podano w tabeli 6. Gęstość objętościowa betonu kontrolnego serii A0.3 oraz betonów modyfikowanych serii B i C wyniosła $2000 \div 2600$ kg/m³, co oznacza, że są to betony zwykłe. Dodatek w postaci odpadów recyklingowych spowodował nieznaczne zmniejszenie średniej gęstości betonów modyfikowanych w porównaniu z betonem bez dodatków. Średnia gęstość objętościowa betonów serii B wynosi 2197,8 kg/m³, natomiast betonów serii C jest to 2176,9 kg/m³, zatem średnio o 20,9 kg/m³ cięższa jest seria betonów B. Nasiąkliwość betonów obu serii jest porównywalna, wartość średnia betonów serii C wynosi 4,68%, natomiast betonów serii B – 4,73%. Maksymalna głębokość penetracji wody pod ciśnieniem betonu C3.1 jest większa o 16 mm w stosunku do betonu B3.1, betonu C3.2 jest większa o 9 mm w stosunku do betonu B3.2, a betonu C3.3 o 5 mm w stosunku do betonu B3.3.

Badanie mrozoodporności betonów modyfikowanych serii B i C oraz betonu kontrolnego serii A0.3 wykonano w przypadku 25 próbek oraz 100 cykli zamrażania i rozmrażania. Wyniki przedstawiono w tabeli 6. Zastosowanie dodatków recyklingowych w ilości 12,5% masy cementu (serie B) spowodowało uzyskanie betonów, które charakteryzowały się mniejszym spadkiem wytrzymałości na ściskanie po 100 cyklach zamrażania – rozmrażania. Zastosowanie dodatków recyklingowych w ilości 15% masy cementu (serie C) spowodowało uzyskanie betonów, które charakteryzowały się również mniejszym spadkiem wytrzymałości na ściskanie po 100 cy-

klach zamrażania – rozmrażania. Częściowe zastąpienie kruszywa dodatkami recyklingowymi umożliwiło uzyskanie betonów bardziej odpornych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono badania betonu modyfikowanego dwoma materiałami recyklingowymi: granulatem gumowym SBR oraz płatkami politereftalanu etylenu PET. Pozwoliły one na ocenę wpływu tych dodatków recyklingowych/modyfikatorów na właściwości betonów modyfikowanych, które w przypadku serii B i C wykazały skuteczność opracowanego rozwiązania. Wykazano również, że skuteczność modyfikacji betonu zależy od odpowiedniego stosunku ilościowego tych dwóch materiałów.

Przedstawione badania potwierdzają, że beton modyfikowany granulatem gumowym SBR i płatkami politereftalanu etylenu PET może być interesującą alternatywą dla tradycyjnych betonów stosowanych w różnego rodzaju konstrukcjach, szczególnie tam, gdzie wymagana jest klasa wytrzymałości betonu C25/30. Opracowane betony umożliwiają zagospodarowanie materiałów recyklingowych, które nieprzetworzone stanowią obciążenie dla środowiska naturalnego. Zanim nowy beton zostanie wdrożony na szeroką skalę, konieczne są dalsze jego badania dotyczące oceny wpływu zastosowanych modyfikacji w ściśle określonych warunkach eksploatacyjnych.

Literatura

[1] Medina NF, Medina DF, Hernandez-Olivares F, Navacerrada MA. Mechanical and thermal pro-

perties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling. *Constr Build Mater.* 2017; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196.

[2] Sofi A. Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete – a review. *Ain Shams Engineering Journal* 2018; DOI: 10.1016/j.asej.2017.08.007.

[3] Ołdakowska E. Ocena wybranych właściwości betonów zwykłych z rozdrobnioną gumą ze zużytych opon samochodowych. *Ecological Engineering.* 2015; DOI: 10.12912/23920629/58902.

[4] Chen Z, Li L, Xiong Z. Investigation on the interfacial behaviour between the rubber-cement matrix of the rubberized concrete, *J Clean Prod.* 2019; DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.305.

[5] Adamczyk I. Guma i politereftalan etylenu – składniki materiałów budowlanych. *Tworzywa Sztuczne w Przemysle.* 2022; DOI: 10.17512/znb.2018.1.01.

[6] Akcaozoglu S, Atis CD, Akcaozoglu K. An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Manage.* 2010; DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.033.

[7] Adamczyk-Królak I. Guma i politereftalan etylenu z recyklingu – składniki materiałów. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* 2018; DOI: 10.17512/znb.2018.1.01.

[8] Karta techniczna granulatu gumowego SBR, Orzeł S. A, Poniatoła, www.orzelsa.com.

[9] PN-EN 933-1:2000 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Oznaczenie składu ziarnowego – Metoda przesiewania.

[10] Karta techniczna piasku płukanego 0-2 mm, www.eurovia.pl.

[11] Karta techniczna kruszywa zwirowego o uziarnieniu 2 – 8 mm, www.eurovia.pl.

[12] PN-EN 933-3:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 3: Oznaczenie kształtu ziarn za pomocą wskaźnika płaskości.

[13] PN-EN 1097-6:2022-07 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczenie gęstości ziarn i nasiąkliwości.

[14] PN-EN 1097-3:2000 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Oznaczenie gęstości nasypowej i jamistości.

[15] Halbiniak J, Kater J, Major M, Major I. A proposition of an in situ production of a blended cement, *Materials*, 2020; DOI: 10.3390/ma-13102289.

[16] Kater J, Halbiniak J, Langier B, Major M, Major I. Influence of varied waste ceramic fillers on the resistance of concrete to freeze-thaw cycles. *Materials*, 2021; DOI: 10.3390/ma14030624.

[17] PN-EN 12350-2:2011 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.

[18] PN-EN 12390-3:2019 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

[19] PN-EN 12390-8:2019 Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.

[20] PN-EN 206:2014-04 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

[21] PN-EN 12390-7:2019 Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu.

[22] PN-B-06265:2018-10 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12.

Przyjęto do druku: 27.07.2023 r.