

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2018), 27 (4), 463–475  
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2018), 27 (4)  
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2018), 27 (4), 463–475  
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2018), 27 (4)  
<http://iks.pn.sggw.pl>  
DOI 10.22630/PNIKS.2018.27.4.44

**Gabriela RUTKOWSKA, Piotr WICHOWSKI, Rafał LIPIŃSKI**

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie  
Faculty of Civil and Environmental Engineering, Warsaw University of Life Sciences – SGGW

## **Wpływ rozdrobnionych odpadów szklanych na wybrane właściwości betonów sporządzonych z ich udziałem**

### **Impact of crushed glass waste on chosen properties of concrete made with its addition**

**Słowa kluczowe:** odpady szklane, wytrzymałość betonu, mrozoodporność

**Key words:** glass waste, concrete strength, frost resistance

### **Wprowadzenie**

Dbłość o środowisko zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, a także wzrost poziomu życia ludzi wprowadzają potrzebę prowadzenia prawidłowej gospodarki odpadami. Branżą o dużym potencjale do zagospodarowania odpadów w ramach recyklingu materiałowego jest budownictwo. Sektor budowlany cechuje duża materiałochłonność, a ograniczona ilość surowców naturalnych sprawia, iż ciągle prowadzone są badania nad możliwością ich zastąpienia innymi powszechnie występującymi składnikami. Cechą przemysłu materiałów budow-

lanych jest również dążenie do ciągłego polepszenia właściwości wytwarzanych materiałów (Pawłowski, 2006; Gicala i Sobotka, 2017). Beton jest jednym z najczęściej produkowanych materiałów budowlanych na świecie. Głównymi powodami jego stosowania są możliwości architektoniczne, elastyczność formy, właściwości mechaniczne, trwałość i stosunkowo niska cena (Randl, Steiner, Ofner, Baumgartner i Mészöly, 2014). Ze względu na powszechne wykorzystanie betonu potrzebne są znaczne ilości kruszywa, które w większości przypadków przekraczają 60% objętości betonu. Użycie odpadów przemysłowych w składzie betonu wpływa na zmniejszenie ilości użytego klinkieru cementowego oraz naturalnych kruszyw do jego wytworzenia (Deja i Antosiak, 2012).

Współcześnie największe zastosowanie do produkcji betonu mają popioły lotne wapienne i krzemionkowe oraz pył krzemionkowy, określane terminem *pulcolana* (Giergiczny, 2007; Maca, Jandekova i Konvalinka, 2014). Prowadzone są badania nad możliwością wykorzystania innych składników, np. popiołu lotnego pochodzącego z termicznego przekształcania osadów ściekowych (Yusur, Noor, Din i Abba, 2012; Rutkowska, Wichowski, Świgoń i Sobieski, 2017; Rutkowska, Wichowski, Fronczyk, Franus i Chalecki, 2018), bio-popiołu powstającego ze spalania drewna i innej biomasy roślinnej (Jura i Ulewicz, 2017) oraz rozdrobnionych odpadów szklanych (Najduchowska, Różycka i Rolka, 2014; Chen, Li i Poon, 2017; Sikora, Horszczaruk, Skoczylas i Rucińska, 2017). Wykorzystanie odpadów zapewnia liczne ekologiczne korzyści, takie jak zmniejszenie kosztów składowania, oszczędność energii i ograniczenie emisji dwutlenku węgla. Ponadto ich wykorzystanie może poprawić mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne zaprawy i betonu (Siddique, 2008).

Obowiązujące wymagania dotyczące ochrony środowiska są coraz bardziej rygorystyczne (Lofti et al., 2014; Lofti, Eggimann, Wagner, Mróz i Deja, 2015). W wielu krajach Europy (Holandia, Niemcy, Belgia) ilość szkła zebrana od konsumentów przekracza 80% wyprodukowanego szkła, w większości jest ono poddawane recyklingowi (FEVE, 2015). Celem przeprowadzonych badań było poznanie wpływu dodania rozdrobnionych odpadów szklanych w czasie sporządzania mieszanki betonowej betonu zwykłego na jego wybrane właściwości techniczne. Uzyskane wyniki pozwoliły

na określenie wytrzymałości i mrozoodporności badanego materiału przy różnej zawartości odpadów szklanych oraz ocenę możliwości ich wykorzystania jako dodatku do betonu.

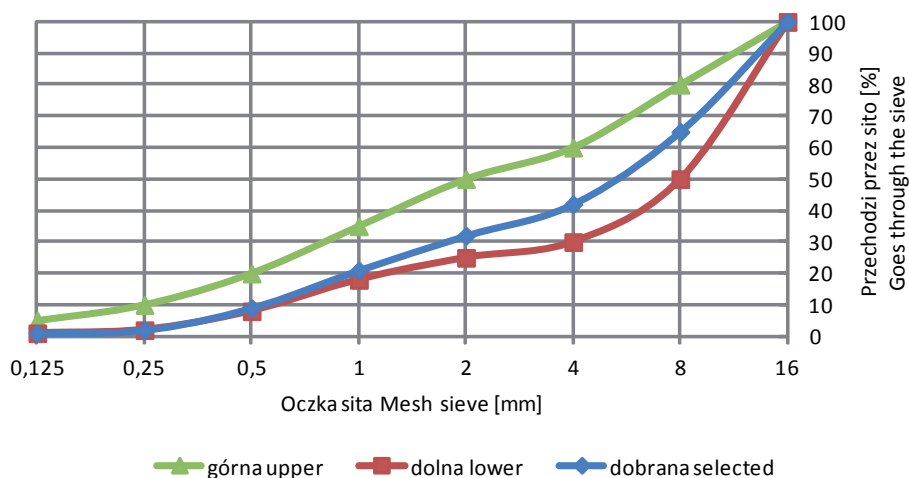
## Material i metodyka

Próbki betonowe do badań zaprojektowano jako beton zwykły zgodnie z normą PN 206+A1:2016-12 (Beton). W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano mieszanki betonowe klasy C20/25 o konsystencji plastycznej S3. We wszystkich próbkach zachowano stały skład granulometryczny kruszywa dobranego metodą krzywych granicznych (rys. 1).

Do przyjętych założeń projektowania mieszanki betonowej betonu zwykłego przy użyciu metody trzech równań ustalono recepturę na  $1\text{ m}^3$  (tab. 1).

Skład mieszanki zaprojektowano wykorzystując metodę trzech równań według Bukowskiego i Kluzy-Eymana (Jamroży, 2005). Do przygotowania próbek betonowych wykorzystano kruszywo naturalne, otoczkowe o uziarnieniu 0,125–16 mm i gęstości  $2,65\text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$ , cement wieloskładnikowy CEM V 32,5R –LH/HSR/NA o następującym składzie chemicznym: zawartość siarczanów jako  $\text{SO}_3$  – 19,5%, zawartość chlorków – 0,078%, zawartość  $\text{Na}_2\text{O}_3$  – 1,16%, spełniający wymagania normy PN-EN 197-1:2012 (Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku). Jako dodatki mineralne do mieszanki betonowej zastosowano stłuczkę szklaną frakcji 2–4 mm (rys. 2) oraz mączkę szklaną (rys. 3) o gęstości  $2,7\text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$  i składzie chemicznym:  $\text{SiO}_2$  – 70–74%,

Dobrana krzywa uziarnienia Selected graining curve



RYSUNEK 1. Skład kruszywa dobrany metodą krzywych granicznych  
 FIGURE 1. Aggregate composition chosen with use of limit curves method

TABELA 1. Udział masowy składników przypadający na 1 m<sup>3</sup> w 1 kg  
 TABLE 1. The mass fraction of ingredients per 1 m<sup>3</sup> in 1 kg

Składniki Components	Mieszanka betonowa – Concrete mix						
	0%	Zamiana cementu Replacement of cement			Zamiana kruszywa Replacement of aggregate 2–4 mm		
		5%	9%	12%	5%	9%	12%
Cement	415,32	394,55	377,94	365,49	415,32	415,32	415,32
Woda – water	184,58	184,58	184,58	184,58	184,58	184,58	184,58
Kruszywo Aggregate	0–2 mm	577,86	577,86	577,86	577,86	577,86	577,86
	2–4 mm	180,58	180,58	180,58	180,58	171,55	164,33
	4–8 mm	415,34	415,34	415,34	415,34	415,34	415,34
	8–16 mm	632,04	632,04	632,04	632,04	632,04	632,04
Mączka szklana Glass powder 0,1 mm	0,00	20,77	37,38	49,83	–	–	–
Słuczka – cullet 2–4 mm	0,00	–	–	–	9,03	16,25	21,67

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,5–2%, CaO – 7–11%, MgO – 3–5%, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O – 13–15%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – max. 0,2%, TiO<sub>2</sub> – max. 0,1% zgodnie z kartą właściwości produktu przekazaną przez dystrybutora odpadów szklanych – firmę F.H.U. Eko-Glass.

Badania polegały na porównaniu wybranych właściwości betonów zwykłych bez dodatków oraz zawierających w swoim składzie mączkę lub słuczke szklaną. Przygotowano siedem rodzajów próbek:



RYSUNEK 2. Słuczka szklana zastosowana w betonie

FIGURE 2. Glass cullet applied in concrete



RYSUNEK 3. Mączka szklana użyta do wykonywanego betonu

FIGURE 3. Glass powder applied in production of the concrete

- bez żadnych dodatków – BZ,
- z zamianą 5% cementu na mączkę – PI 5%,
- z zamianą 9% cementu na mączkę – PI 9%,
- z zamianą 12% cementu na mączkę – PI 12%,
- z zamianą 5% kruszywa na słuczke szklaną – PII 5%,
- z zamianą 9% kruszywa na słuczke szklaną – PII 9%,
- z zamianą 12% kruszywa na słuczke szklaną – PII 12%.

W celu scharakteryzowania właściwości uzyskanych mieszank betono-

wych przeprowadzono badania następujących parametrów: gęstość pozorną metodą pomiaru masy i objętości (PN-EN 12350-6:2011. Badania mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość), konsystencja mieszanek betonowych metodą stożka opadowego (PN-EN 12350-2:2001. Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badania konsystencji metodą opadu stożka) oraz zawartość powietrza metodą ciśnieniową (PN-EN 12350-7:2011. Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badania zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe). Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie dla próbek o wymiarach  $10 \times 10 \times 10$  cm (PN-EN 12390-3:2011. Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania). Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po upływie 7-, 14-, 28- i 56-dniowego okresu dojrzewania betonu. Badania wytrzymałości na zginanie wykonano na próbkach o wymiarach  $10 \times 10 \times 50$  cm (PN-EN 12390-5:2011. Badania betonu. Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badania po 56 dniu dojrzewania betonu). Badania mrozoodporności wykonano na próbkach o wymiarach  $15 \times 15 \times 15$  cm metodą bezpośrednią według procedury opisanej w normie PN-B-06265:2004 (Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1:2003. Beton część 1: wymagania, właściwości, produkcja i zgodność). Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej hydraulicznej H011 Matest, na zginanie w maszynie wytrzymałościowej ZD-40, a mrozoodporność w komorze firmy Toropol. Wszystkie próbki przeznaczone do badań pielęgnowano w wodzie. Do każdej serii badania

wytrzymałości na ściskanie i zginanie wykonano po 3 próbki, a do badania mrozoodporności po 12 próbek (6 próbek świadków i 6 próbek poddanych mrozoodporności).

## Wyniki badań mieszanki betonowej

Na podstawie przeprowadzonych badań gęstości mieszanki betonowej według normy PN-EN 12350-6:2011 stwierdzono, że wartości dla poszczególnych próbek są zbliżone i zawierają się w przedziale 2384–2397  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , analogicznie do wyników normowych

ze wzrostem ilości mączki szklanej ilość powietrza rośnie, podobnie jest przy wymianie kruszywa na słuczkę – wraz z rosnącą ilością szkła odpadowego zawartość powietrza rośnie. Podczas przeprowadzania badania konsystencji opad stożka dla mieszanki betonowej bez dodatków był największy i wynosił 12,0 cm, a najmniejszy równy 4,5 cm zaobserwowano w mieszance, w której wymieniono 12% kruszywa na słuczkę. W przypadku wymiany cementu i kruszywa należy zauważyć, że im większa ilość wymienionego składnika, tym mniejszy opad stożka. Wyniki przeprowadzonych badań mieszanki betonowej zestawiono w tabeli 2.

TABELA 2. Zestawienie wyników badań mieszanki betonowej  
TABLE 2. Test results of concrete mix

Próbka Sample	Gęstość świeżej mieszanki Density of fresh mix [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Opad stożka Fall of the cone [cm]	Konsystencja Consistency [-]	Zawartość powietrza Air content [%]
BZ	2393	12,00	S3	1,80
PI 5%	2389	10,50	S3	2,00
PI 9%	2386	9,00	S2	2,10
PI 12%	2384	6,50	S2	2,40
PII 5%	2394	10,00	S3	2,10
PII 9%	2396	6,00	S2	2,40
PII 12%	2397	4,50	S2	2,80

betonów zwykłych (2000–2600  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Przy wymianie cementu należy zauważyć, że im większa ilość dodanej mączki, tym mniejsza gęstość, przy wymianie kruszywa – im większa zawartość słuczki, tym gęstość większa. Mieszanka porównawcza wykazała najmniejszą zawartość powietrza, równą 1,80%. W przypadku wymiany cementu wraz

## Wyniki badań betonu

### Wytrzymałość na ściskanie

Badania wytrzymałości próbek betonowych na ściskanie przeprowadzono według normy PN-EN 12390-3:2011 (Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania

w maszynie wytrzymałościowej). Wyniki wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania w wodzie, odchylenie standardowe oraz niepewność rozszerzoną całkowitą zawarto w tabeli 3, a wzrost wytrzymałości na ściskanie w funkcji czasu dla badanych próbek przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

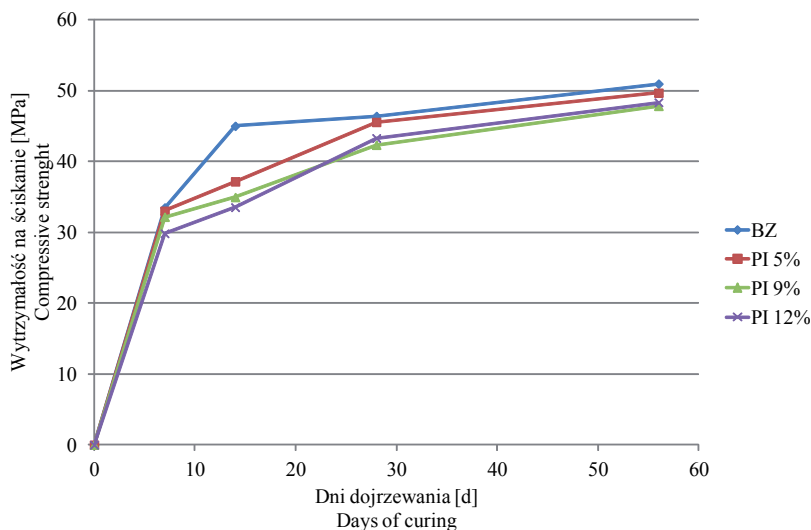
Wytrzymałość betonu na ściskanie odgrywa podstawową rolę w projektowaniu, wykonawstwie i użytkowaniu konstrukcji. Zgodnie z zaleceniami

Brunarskiego i Dohojdy (2016) oraz normy PN-EN ISO/IEC 17025:2005 (Ogólne wymagania dotyczące laboratoriów badawczych i wzorcujących) wraz z procedurą ISO (1993) do szacowania rozszerzonej (całkowitej) niepewności wyników pomiaru  $U_p$ , wykorzystano metodę sklerometryczną, nieskalowaną. Dla badanych próbek betonu uzyskano dużą jednorodność niepewności rozszerzonej zawierającą się w przedziale od 0,87 MPa (dla próbek PI 9%) do 1,02 MPa

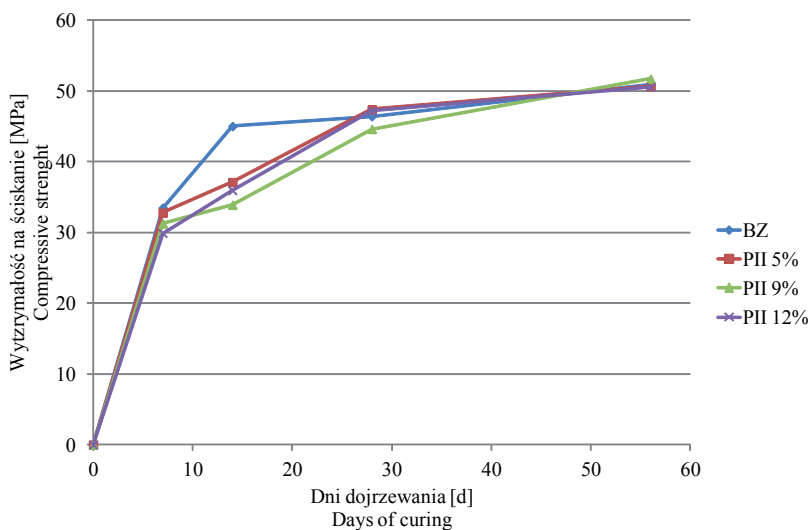
TABELA 3. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania oraz współczynnika niepewności rozszerzonej.

TABLE 3. Test results of compressive strength after 28 days of maturation and extended uncertainty for samples.

Próbka Sample	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength [MPa]	Średnia wytrzyma- łość na ściskanie Average compressi- ve strength [MPa]	Odchylenie standardowe Standard deviation [MPa]	Niepewność rozszerzona Extended uncertainty $U_{p=0,75}$ $U_{p=0,95}$ [MPa]
BZ	43,66 44,46 44,10	44,07	0,40	1,01 2,65
PI 5%	43,00 43,59 43,22	43,27	0,29	0,96 2,52
PI 9%	40,36 40,35 40,05	40,25	0,18	0,87 2,29
PI 12%	41,29 40,78 41,26	41,11	0,29	0,92 2,40
PII 5%	45,08 45,07 44,86	45,00	0,12	0,96 2,53
PII 9%	42,23 42,52 42,30	42,35	0,15	0,92 2,39
PII 12%	44,53 45,24 44,69	44,82	0,37	1,02 2,67



RYSUNEK 4. Rozwój wytrzymałości na ściskanie w czasie dla próbek z mączką szklaną  
 FIGURE 4. The development of compressive strength during for samples with glass powder



RYSUNEK 5. Rozwój wytrzymałości na ściskanie w czasie dla próbek ze stłuczką szklaną  
 FIGURE 5. The development of compressive strength during for samples with glass cullet

(dla próbek PII 12%) przy poziomie ufności  $U_{p=0,75}$  oraz od 2,29 MPa (dla próbek PI 9%) do 2,67 MPa (dla próbek PII 12%) przy poziomie ufności  $U_{p=0,95}$ .

Z rysunków 4 i 5 wynika, że beton referencyjny uzyskiwał wyraźnie większą wytrzymałość po 14 dniach dojrzewania. Wzrost stopnia zamiany cementu

na mączkę szklaną wpłynął na nieznaczne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie przy okresie dojrzewania 28 i 56 dni. W przypadku zamiany kruszywa na stłuczkę szklaną przy dłuższym okresie dojrzewania (56 dni) wytrzymałość analizowanych próbek była porównywalna.

### Wytrzymałość na zginanie po 56 dniach

Badanie wytrzymałości próbek betonowych na zginanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-5:2011. Badania przeprowadzono na belkach o wymiarach 100 × 100 × 500 mm po 56 dniach dojrzewania. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie betonów z różną zawartością mączki i stłuczki szklanej zestawiono na rysunkach 6 i 7.

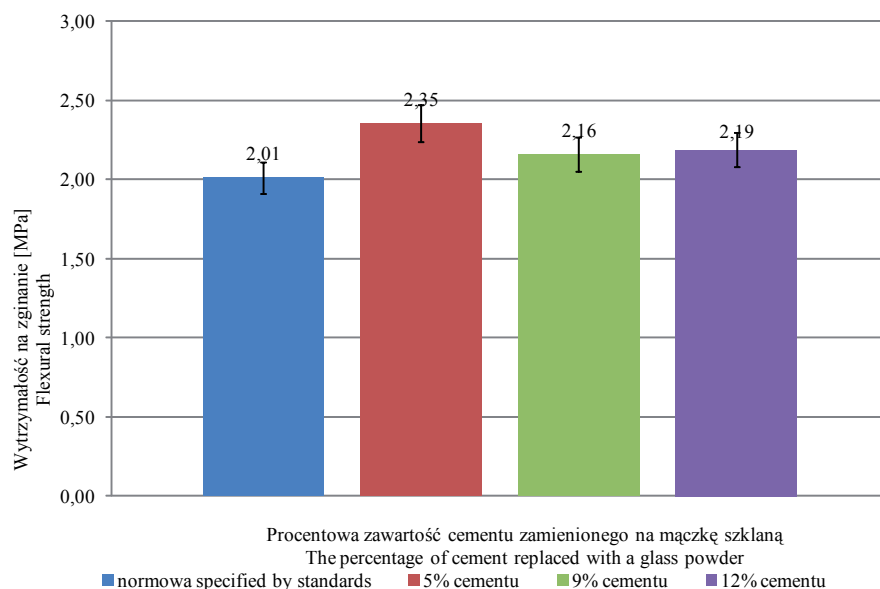
Wytrzymałość na zginanie wzrosła we wszystkich próbkach z wymianą ce-

mentu w stosunku do próbki referencyjnej. Najmniejsza wartość wynosiła 2,01 MPa, a największa 2,35 MPa dla próbek o zawartości 5% mączki szklanej.

Ilość stłuczki szklanej o frakcji 2–4 mm nie miała wpływu na wytrzymałość na zginanie w badanym zakresie zawartości stłuczki. Porównywalną wartość zanotowano dla wszystkich badanych próbek.

### Mrozoodporność

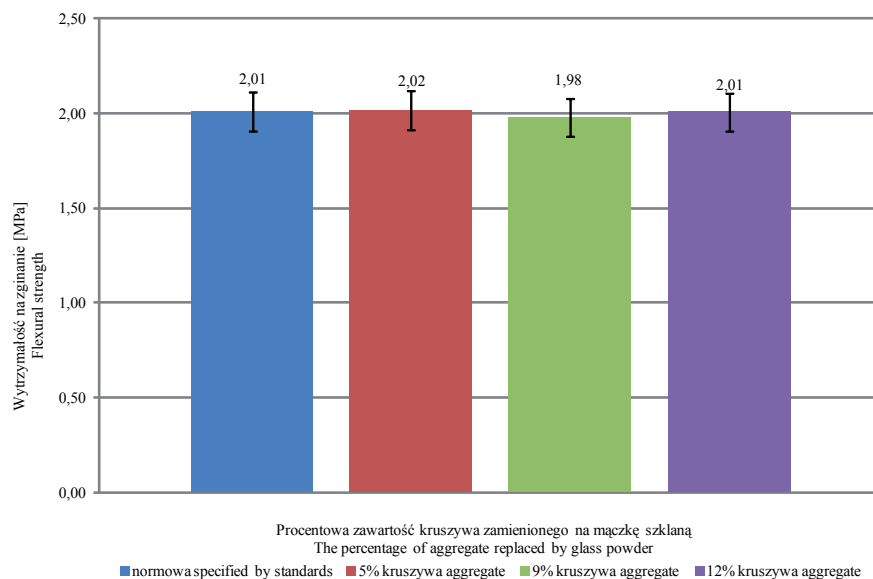
Badanie mrozoodporności polega na określeniu spadku wytrzymałości na ściskanie próbki zamrażanej w stosunku do próbki niezamrażanej. Obniżenie wytrzymałości na ściskanie nie powinno być większe niż 20%, próbki poddane zamrażaniu nie powinny mieć pęknięć, a ubytek masy nie powinien przekroczyć 5%. W tabeli 4 zestawiono wyniki



RYSUNEK 6. Średnia wytrzymałości na zginanie betonu po 56 dniach dojrzewania dla próbek z mączką szklaną

FIGURE 6. Average bending strength of concrete after 56 days of maturation for samples with glass powder





RYSUNEK 7. Średnia wytrzymałości na zginanie betonu po 56 dniach dojrzewania dla próbek ze stłuczką szklaną

FIGURE 7. Average bending strength of concrete after 56 days of maturation for samples with glass cullet

TABELA 4. Zestawienie średniego spadku wytrzymałości próbek poddanych mrożeniu oraz średniego ubytku masy próbek

TABLE 4. Comparison of the average strength decrease of frozen samples and the average loss in mass

Próbka Sample	Średnia wytrzymałość na ściskanie Average compressive strength		Średni spadek wytrzyma- łości próbek po mrożeniu Average strength decrease of frozen samples [%]	Średnia masa Average mass		Średni ubytek masy Average loss in mass [%]
	świadka reference sample [MPa]	po 150 cyklach mrożenia after 150 freeze-thaw cycles [MPa]		przed mroże- niem before fre- ezing [g]	po 150 cyklach mrożenia after 150 freeze-thaw cycles [g]	
BZ	57,22	50,90	-11,05	2412	2409	0,12
PI 5%	55,11	51,83	-5,94	2411	2408	0,12
PI 9%	54,91	51,35	-6,49	2414	2401	0,67
PI 12%	52,12	48,41	-7,12	2398	2382	0,54
PII 5%	53,75	52,15	-2,98	2406	2390	0,17
PII 9%	50,98	48,92	-4,04	2385	2381	0,50
PII 12%	54,34	52,69	-3,02	2395	2379	0,67

wytrzymałości na ściskanie próbek porównawczych oraz tych po 150 cyklach mrożenia.

W przypadku próbek porównawczych największą wytrzymałością na ściskanie charakteryzuje się beton BZ. Średnia wytrzymałość wyniosła 57,22 MPa, a najmniejszą wytrzymałością (50,98 MPa) charakteryzowały się próbki PII 9%. Rozpatrując wytrzymałość na ściskanie próbek po 150 cyklach mrożenia, zauważa się, że najwytrzymalsze były próbki PII 12%. Średnia wytrzymałość wynosiła tu 52,69 MPa. Najmniejszą wytrzymałość po 150 cyklach mrożenia charakteryzował się beton PI 12% (48,41 MPa). Średni spadek wytrzymałości próbek poddanych mrożeniu w żadnym przypadku nie przekroczył 20%. Najniższy spadek wytrzymałości wystąpił w próbce PII 5%, a najwyższy w próbce BZ bez dodatków. Wartości wynosiły odpowiednio 2,98 i 11,05%. Średni ubytek masy w badanych próbkach po odbytych 150 cyklach mrożenia wahał się w granicach od 0,12% dla próbki BZ do 0,67% dla próbki PII 12%. Próbki wykorzystane w tym badaniu były poddane 150 cyklom zamrażania i odmrażania oraz działaniu wody, dlatego można im przypisać stopień mrozoodporności F150.

## Dyskusja wyników i wnioski

Badania prowadzone przez Sikorę, Horszczaruka, Skoczylasa i Rucińską (2017) wykazały, że odpady szklane (brązowe szkło sodowo-wapienne) mogą być skutecznym substytutem naturalnego, drobnego piasku, poprawiając izolacyjność termiczną zapraw cemen-

towych bez pogorszenia wytrzymałości na ściskanie. Zespół Tamanna badał właściwości zaprawy, w której cement częściowo zastępowano proszkiem szklanym o różnej granulacji na poziomach 10, 20, 30 i 40% (Tamanna, Mohamed Sutan, Yakub i Lee, 2014). Wymiana 10% cementu na proszek szklany pozwalała uzyskać większą wytrzymałość na ściskanie niż dla innych poziomów zastąpienia. Częstki szkła drobniejszego uzyskiwały porównywalnie lepszy wynik niż cząstki grubsze. Prezentowane w artykule wyniki badań dla betonów potwierdzają, że wykorzystanie mączki lub stłuczki szklanej, jako substytutów odpowiednio cementu lub kruszywa, nie wpłynęło w sposób znaczący na pogorszenie wytrzymałości na ściskanie. Jedynie w początkowym okresie, po 14 dniach dojrzewania zaobserwowano nieco gorszą wytrzymałość. Świadczy to o intensyfikacji reaktywności pucolanowej dodatków szklanych z czasem. Badania wykonane przez Ismaila i Al-Hashmiego (2009), dotyczące betonu, w którym zastąpiono 20% kruszywa drobnego odpadami szklanymi, wykazały wzrost wytrzymałości na zginanie i ściskanie po 28 dniach dojrzewania w porównaniu do próbek kontrolnych niezawierających szklanych dodatków.

Na podstawie uzyskanych wyników wyciągnięto wnioski:

1. Wzrost ilości mączki szklanej w mieszance betonowej wpłynął na zmniejszenie gęstości świeżej mieszanki i opadu stożka oraz na zwiększenie liczby pęcherzyków powietrza.
2. Wzrost ilości stłuczki szklanej spowodował zwiększenie gęstości i zawartości powietrza oraz zmniejszenie opadu stożka.

3. Gęstość mieszanki betonowej pozostała w przedziale charakterystycznym dla betonów zwykłych wynoszącym 2000–2600 kg·m<sup>-3</sup>.
4. Wykorzystanie odpadów szklanych w analizowanym zakresie wpłynęło nieznacznie na pogorszenie wytrzymałości na ściskanie analizowanych próbek. Po 28 i 56 dniach sezonowania obserwuje się znacznie mniejszy wpływ odpadów szklanych na pogorszenie wytrzymałości betonów w stosunku do 14-dniowego okresu dojrzewania. Świadczy to o intensyfikacji reaktywności pucolanowej odpadów szklanych z czasem.
5. Betony zawierające mączkę szklaną wykazały się nieco lepszą wytrzymałością na zginanie w stosunku do betonu porównawczego, a betony zawierające słuczkę szklaną charakteryzowały się porównywalną wytrzymałością w odniesieniu do betonu referencyjnego.
6. Badania wykazały, że analizowane betony są mrozoodporne. Betony zawierające mączkę w ilości 5, 9% oraz słuczkę w ilościach 5, 12% uzyskały lepsze parametry wytrzymałościowe po 150 cyklach zamrażania i odmrażania niż beton referencyjny.
7. Dla ściskanych próbek betonu po 28 dniach dojrzewania uzyskano wysoką jednorodność niepewności rozszerzonej przy poziomie ufności  $U_{p=0,75}$  oraz  $U_{p=0,95}$ . Świadczy to o dużej powtarzalności uzyskanych wyników.
8. Zainicjowane badania powinny być kontynuowane dla szkła o ściśle określonym składzie chemicznym i innych granulacjach.

## Literatura

- Brunarski, L. i Dohojda, M. (2016). An approach to in-situ compressive strength of concrete. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*, 64, 687-695.
- Chen, Z., Li J.S. i Poon, C.S. (2017). Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1447-1459.
- Deja, J. i Antosiak, B. (2012). Degree of progress of the fly ash reaction in alkali-activated fly-ash binders. *Cement, Wapno, Beton*, 2, 67-76.
- The European Container Glass Federation – FEVE (2015). *Press Release*. Pobrano z lokalizacji: <http://feve.org/wp-content/uploads/2016/04/Press-Release-EU.pdf>.
- Gicala, M. i Sobotka, A. (2017). Analiza rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych budynków z uwzględnieniem wymogów zrównoważonego rozwoju. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 26(2), 159-170.
- Giergiczny, Z. (2007). Dodatki do betonu w świetle wymagań normowych. *Materiały Budowlane*, 11, 10-13.
- Ismail, Z.Z. i Al-Hashmi, E.A. (2009). Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 29(2), 655-659.
- ISO (1993). *Guide to the Expression of Uncertainty Measurement*. Warszawa: GUM.
- Jamróży, Z. (2005). *Beton i jego technologie*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Jura, J. i Ulewicz, M. (2017). Wpływ bio-popiołów na wybrane właściwości zapraw cementowych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 26(2), 234-240.
- Lofti, S., Deja, J., Rem, P., Mróz, R., Van Roekel, E. i Van Der Stelt, H. (2014). Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 117-125.
- Lofti, S., Eggimann, M., Wagner, E., Mróz, R. i Deja, J. (2015). Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. *Construction and Building Materials*, 95, 243-256.
- Maca, P., Jandekova, P. i Konvalinka, P. (2014). Wpływ dodatku metakaolinu na odporność

- betonu na powstawanie odprysków pod działaniem mrozu. *Cement Wapno Beton*, 1, 1-7.
- Najduchowska, M., Różycka, K. i Rolka, G. (2014). Ocena możliwości wykorzystania stłuczki szklanej w przemyśle budowlanym w aspekcie jej wpływu na środowisko naturalne. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*, 17, 46-56.
- Pawłowski, A. (2006). Wielowymiarowość zrównoważonego rozwoju. *Problemy Eko-rozwoju/Problems of Sustainable Development*, 1, 23-32.
- PN-B-06265:2004. Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1:2003. Beton. Część 1: wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- PN-EN 12350-2:2001. Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badania konsystencji metodą opadu stożka.
- PN-EN 12350-6:2011. Badania mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość.
- PN-EN 12350-7:2011. Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badania zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.
- PN-EN 12390-3:2011. Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badania.
- PN-EN 12390-5:2011. Badania betonu. Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badania.
- PN-EN 197-1:2012. Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- PN-EN 206+A1:2016-12. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- PN-EN ISO/IEC 17025:2005. Ogólne wymagania dotyczące laboratoriów badawczych i wzorcujących.
- Randl, N., Steiner, T., Ofner, S., Baumgartner, E. i Mészöly, T. (2014). Development of UHPC mixtures from an ecological point of view. *Construction and Building Materials*, 67, 373-378.
- Rutkowska, G., Wichowski, P., Świgoń, K. i Sobieski, P. (2017). Badanie właściwości betonów z dodatkiem popiołów lotnych pochodzących z termicznej obróbki osadów. *Cement, Wapno, Beton*, 2, 113-119.
- Rutkowska, G., Wichowski, P., Fronczyk, J., Franus, M. Chalecki, M. (2018). Use of fly ashes from municipal sewage sludge combustion in production of ash concretes. *Construction and Building Materials*, 188, 874-883.
- Siddique, R. (2008). *Waste materials and by-products in concrete*. Berlin: Springer-Verlag.
- Sikora, P., Horszczaruk, E., Skoczylas, K. i Rucińska, T. (2017). Thermal properties of cement mortars containing waste glass aggregate and nanosilica. *Procedia Engineering*, 196, 159-166.
- Tamanna, N., Mohamed Sutan, N., Yakub, I. i Lee, D.T.C. (2014). Strength Characteristics of Mortar Containing Different Sizes Glass Powder. *UNIMAS e-Journal of Civil Engineering*, 5(1), 11-16.
- Yusur, R.O., Noor, Z.Z., Din M.D.F.M.D. i Abba A.H. (2012). Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete-a review. *International Journal of Global Environmental*, 12(2), 214-228.

## Streszczenie

**Wpływ rozdrobnionych odpadów szklanych na wybrane właściwości betonów sporządzonych z ich udziałem.** Celem przeprowadzonych badań było poznanie wpływu dodania rozdrobnionych odpadów szklanych w trakcie sporządzania mieszanki betonowej betonu zwykłego na jego wybrane właściwości techniczne. W badanym zakresie mączka szklana wpłynęła nieznacznie na pogorszenie wytrzymałości na ścislenie, stłuczka szklana natomiast nie miała wpływu na wytrzymałość na ścislenie po 56 dniach dojrzewania. Dodatek mączki szklanej zwiększa wytrzymałość na zginanie, dodatek stłuczki szklanej utrzymuje porównywalną wytrzymałość na zginanie w stosunku do betonu referencyjnego. Uzyskane betony to betony mrozoodporne F150.

## Summary

**Impact of crushed glass waste on chosen properties of concrete made with its addition.** The aim of the performed investigations was to learn about an influence of ad-

dition of crushed glass waste on some selected technical properties of concrete. The glass powder or crushed glass was added during making of a concrete mix. In the studied range, the glass powder had a slight influence on the deterioration of compressive strength, whereas cullet had no effect on the compressive strength after 56 days of maturation. The addition of glass powder increases the bending strength, the addition of cullet maintains comparable bending strength in comparison to the reference concrete. The concretes obtained are F150 frost-resistant concretes.

**Authors' address:**

Gabriela Rutkowska, Piotr Wichowski  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
w Warszawie  
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Katedra Inżynierii Budowlanej  
ul. Nowoursynowska 159, 02-766 Warszawa  
Poland  
e-mail: gabriela\_rutkowska@sggw.pl  
piotr\_wichowski@sggw.pl