

dr inż. Robert Jurczak<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0003-3149-7497

mgr inż. Filip Szmatała<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0001-9725-1540

dr inż. Tomasz Rudnicki<sup>3)</sup>

ORCID: 0000-0003-4522-2750

dr hab. inż. Jacek Korentz, prof. UZ<sup>4)</sup>

ORCID: 0000-0002-1521-8681

# Wpływ mielonego szkła z recyklingu na wytrzymałość i trwałość betonów o niskiej klasie wytrzymałości

## *Effect of recycled glass powder on the strength and durability of low strength concretes*

DOI: 10.15199/33.2021.11.07

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę wpływu dodatku stłuczki szklanej na właściwości betonu klasy C12/15, który stosuje się na drogach krajowych do wykonywania ław przy układaniu korytek ściekowych i krawężników. Mielone szkło dodawano bez zmniejszania ilości cementu. Jako zmienne niezależne przyjęto stosunek woda/cement oraz dodatek mielonego szkła wyrażony jako masowy stosunek jego zawartości do masy cementu. Przyjęty program badawczy obejmował głównie określenie wytrzymałości betonu na ściskanie, nasiąkliwość i odporności na działanie mrozu po 25 i 100 cyklach zamrażania i rozmrażania. Określono również charakterystykę porów powietrznych w stwardniałym betonie. Uzyskane wyniki badań potwierdziły korzystny wpływ dodatku mielonej stłuczki szklanej na zwiększenie wytrzymałości i trwałości betonu.

**Słowa kluczowe:** recykling; stłuczka szklana; mielone szkło; beton; wytrzymałość na ściskanie; trwałość.

**Abstract.** This paper presents an analysis of the effect of the addition of cullet on the properties of concrete of class C12/15, which is used on national roads to make footings for laying gutters and kerbs. Ground glass was added without reducing the amount of cement. The water/cement ratio and the addition of ground glass expressed as the mass ratio of its content to that of cement were adopted as independent variables. The research programme mainly involved determining the compressive strength of the concrete, water absorption and frost resistance after 25 and 100 freeze-thaw cycles. The characteristics of air pores in hardened concrete were also determined. The results obtained showed a beneficial effect of the addition of ground cullet on increasing the strength and durability of concrete.

**Keywords:** recycling; waste glass; glass powder; concrete; compressive strength; durability.

Dotychczas przeprowadzono wiele badań nad możliwością wykorzystania rozdrobnionej stłuczki szklanej jako częściowego zamiennika cementu i kruszywa w betonie [1, 3, 6, 8, 19]. Dotyczy to przede wszystkim betonów o niskiej klasie wytrzymałości (do C20/25). Ich wyniki [7] wskazują, że największy wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie, zginanie i rozciąganie powoduje dodatek mączki szklanej w ilości 15%. Wieloletnie obserwacje wykazały ciągłą poprawę właściwości mechanicznych i odporności na penetrację jonów chlorkowych przez beton zawierający

mielone szkło ze względu na jego reaktywność pucolanową. Ponadto zmniejszeniu uległa nasiąkliwość i porowatość betonu z dodatkiem szkła mielonego [9]. Jego wprowadzenie jako zamiennika cementu lub kruszywa może zmniejszyć efekty reakcji alkalicznej krzemionki (ASR) [18]. Beton z cementem zastąpionym w 15% i 30% mączką szklaną wykazywał największy wzrost wytrzymałości i odpowiednio najmniejszą porowatość [2]. Inne badania [21] pokazały, że zastosowanie proszku szklanego pochodzącego z recyklingu (RGP) jako zamiennika cementu jest możliwe przy poziomie zastąpienia do 10%. Stłuczka ze szkła płaskiego może być również stosowana do produkcji nowych wyrobów, np. mikrokulek szklanych lub włókien szklanych [20].

Biorąc pod uwagę, że zdecydowana większość prac badawczych koncentruje się nad stosowaniem w betonie stłuczki szklanej jako częściowego za-

miennika cementu i kruszywa drobnego, postanowiliśmy przeanalizować jej wykorzystanie jako wypełniacza, bez zmniejszania ilości cementu.

### Metody badań

W ramach badań przygotowano plan eksperymentu, który wygenerowano za pomocą programu Statistica (moduł „Planowanie doświadczeń”) [22]. Wybrano plan dwuczynnikowy polisekcyjno-rotacyjno-quasiuniformalny z dwukrotnym powtórzeniem doświadczenia w punkcie centralnym. Należy on do planów statycznych, zdefiniowanych i polisekcyjnych. Układ punktów w planie eksperymentu przedstawiono na rysunku 1. Badania wykonano na betonach wykonanych z kruszywa naturalnego dla pięciu pośrednich wartości wielkości wejściowych  $x_1$  (W/C) i  $x_2$  (GP/C). Wielkościami wejściowymi były stosunek wodno-cementowy (W/C) w przedziale  $0,73 \div 0,87$  i dodatek mie-

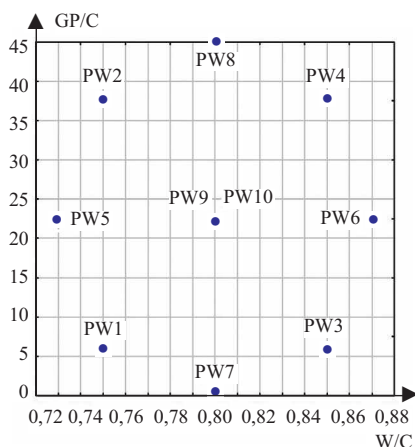
<sup>1)</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; Wydział Budownictwa i Architektury

<sup>2)</sup> Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad Oddział Szczecin

<sup>3)</sup> Wojskowa Akademia Techniczna; Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji

<sup>4)</sup> Uniwersytet Zielonogórski; Instytut Budownictwa

<sup>\*</sup> Adres do korespondencji: robert.jurczak@zut.edu.pl



Rys. 1. Układ punktów w planie eksperymentu

Fig. 1. Applied central composite design

lonego szkła, wyrażony jako masowy stosunek jego zawartości do masy cementu, wynoszący  $0 \div 45\%$ . Łącznie wykonano 9 serii betonów, które różniły się składem mieszanki betonowej. Badania przeprowadzono dla pięciu pośrednich wartości wielkości wejściowych  $x_1$  i  $x_2$  wyznaczonych w przypadku wartości unormowanych wynoszących  $0, \pm 1$  i  $\pm 1,414$ . Wynikające z przyjętego planu wartości unormowane przeliczono na wartości rzeczywiste zmiennych. Wartości kodowe wraz ze składem w poszczególnych seriach przedstawiono w tabeli 1. Jak można zauważyć, układy planu (mieszanka betonowa oznaczona jako PW9 i PW10) przedstawiają te same kombinacje wartości wielkości wejściowych. Powtórzenie doświadczenia dla tych kombinacji jest niezbędne w celu wyznaczenia błędu wynikającego z niepewności pomiaru wielkości wyjściowej. Skład kontrolnej (bez dodatku) mieszanki betonowej (oznaczona w planie eksperymentu jako

Tabela 1. Wartości kodowe, zmienne rzeczywiste

Table 1. List of coded and actual variables

Symbol mieszanki	Wartość kodowa		Zmienne rzeczywiste	
	$x_1$	$x_2$	W/C ( $x_1$ )	GP/C ( $x_2$ )
PW1	-1	-1	0,75	6,6
PW2	-1	1	0,75	38,4
PW3	1	-1	0,85	6,6
PW4	1	1	0,85	38,4
PW5	-1,414	0	0,73	22,5
PW6	1,414	0	0,87	22,5
PW7	0	-1,414	0,80	0,0
PW8	0	1,414	0,80	45,0
PW9	0	0	0,80	22,5
PW10	0	0	0,80	22,5

PW7) przyjęto na podstawie analizy receptur betonów klasy C12/15 stosowanych na drogach krajowych w województwie zachodniopomorskim. Należy wspomnieć, że przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni dróg krajowych wg katalogów [4, 5] beton cementowy stosuje się jedynie do warstwy nawierzchniowej. Nie przewidziano jego stosowania w innych warstwach, np. podbudowy.

Wielkością stałą był rodzaj i klasa cementu, rodzaj kruszywa drobnego i grubego, sposób dozowania składników, sposób i czas mieszania oraz zagęszczenia mieszanki betonowej, warunki dojrzewania próbek, czas i warunki badania, a także użyty sprzęt badawczy. Do przygotowania szkła mielonego wykorzystano szkło opakowaniowe. Oczyszczone i wysuszone brązowe butelki rozdrabniano w dwóch etapach. W etapie pierwszym butelki rozdrabniano w laboratoryjnej kruszarce i młynie, a następnie w mikro-Devalu. Gęstość szkła mielonego wykorzystanego do badań wynosiła  $2,515 \text{ g/cm}^3$ , a gęstość cementu  $3,102 \text{ g/cm}^3$ . Rezultaty pomiarów powierzchni właściwej wg Blaine'a wskazują, że szkło mielone charakteryzuje się większą powierzchnią właściwą ( $4737 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) niż cement ( $3728 \text{ cm}^2/\text{g}$ ).

W tabeli 2 podano skład wykonanych mieszanek betonowych. Zastosowano 200 kg cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, który nie zawiera oprócz klinkieru innych składników głównych (ograniczenie wprowadzania dodatkowych zmiennych). Kruszywo drobne stanowił płukany piasek 0/2 mm. Zawar-

Tabela 2. Receptury badanych mieszanek betonowych

Table 2. Specifications of the tested concrete mixes

Symbol mieszanki	Skład mieszanki betonowej wg przyjętego planu [kg]					
	CEM I 42,5 R	piasek 0/2	żwir 2/8	żwir 8/16	woda	szkło mielone
PW1	200	900	430	450	150	13,2
PW2					150	76,8
PW3					170	13,2
PW4					170	76,8
PW5					146	45,0
PW6					174	45,0
PW7					160	0,0
PW8					160	90,0
PW9					160	45,0
PW10					160	45,0

tość piasku w stosie okruchowym wynosiła 50,6%. Jako kruszywa grubego użyto żwirów o uziarnieniu 2/8 mm i 8/16 mm.

### Wyniki badań i ich analiza

Po wykonaniu mieszanek betonowych określono następujące cechy:

- konsystencję metodą opadu stożka zgodnie z PN-EN 12350-2 [11];
- zawartość powietrza metodą ciśnieniową zgodnie z PN-EN 12350-7 [12];
- gęstość zgodnie z PN-EN 12350-6 [13].

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3.

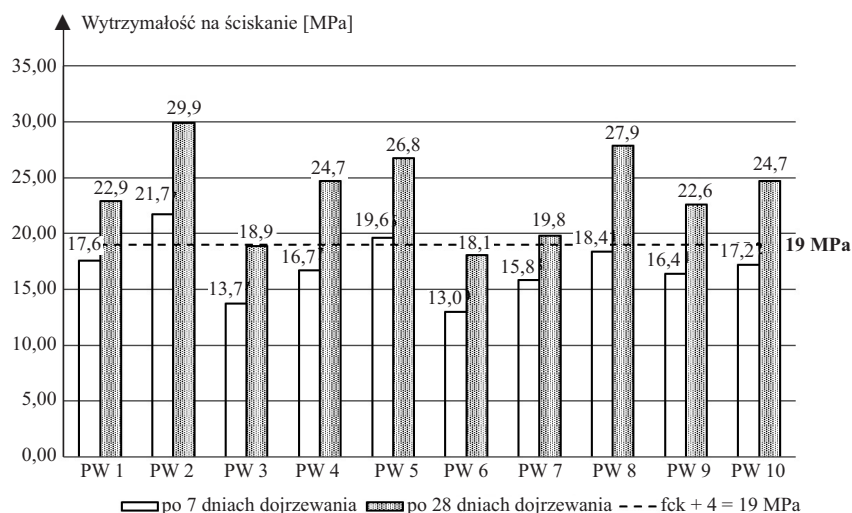
Tabela 3. Wyniki pomiarów konsystencji, zawartości powietrza i gęstości mieszanki betonowej

Table 3. Consistency, air content and density of the tested concrete mixes

Symbol mieszanki	Współczynnik		Konsystencja [mm]	Zawartość powietrza [%]	Gęstość [ $\text{kg/m}^3$ ]
	W/C	GP/C			
PW1	0,75	6,6	20	4,0	2244
PW2	0,75	38,4	10	4,9	2245
PW3	0,85	6,6	20	5,0	2219
PW4	0,85	38,4	50	4,1	2242
PW5	0,73	22,5	10	4,8	2260
PW6	0,87	22,5	70	4,2	2237
PW7	0,80	0,0	20	4,7	2241
PW8	0,80	45,0	30	5,1	2273
PW9	0,80	22,5	30	5,0	2237
PW10	0,80	22,5	30	4,8	2245

**Pomiaru konsystencji i zawartości powietrza** dokonywano jednokrotnie po 15 min od dodania wody do mieszanki. Dwie badane mieszanki betonowe (PW4 i PW6) osiągnęły klasę konsystencji S2, a pozostałe S1. Zawartość całkowitego powietrza w mieszankach wynosiła  $4,0 \div 5,1\%$ , a gęstość betonu  $2219 \div 2273 \text{ kg/m}^3$ . Dodatek mielonego szkła, przy identycznym stosunku wodno-cementowym, nie wpływa na zawartość powietrza w mieszance betonowej i jej konsystencję.

Z każdej mieszanki betonowej wykonano 6 próbek do oznaczenia **wytrzymałości na ściskanie** po 7 i 28 dniach dojrzewania w wodzie o temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Badania stwardniałego betonu wykonano zgodnie z PN-EN 12390-3 [14] na próbkach sześciennych o krawędzi 150 mm. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki średniej wytrzymałości na ściskanie. Wymaganą minimalną wytrzymałość betonu klasy C12/15 na ściskanie oznaczono linią przerywaną. Dodatkowo w nawiasach podano wartości



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie betonu po 7 i 28 dniach dojrzewania

Fig. 2. Compressive strength of concrete after curing for 7 and 28 days

$x_1$  (W/C) i  $x_2$  (GP/C) obok symbolu mieszanki betonowej. Uzyskano wytrzymałość na ściskanie 18,1 ÷ 29,9 MPa. Założoną klasę wytrzymałości na ściskanie C12/15 zgodnie z PN-EN 206 [15] po 28 dniach dojrzewania osiągnięto w przypadku siedmiu z dziewięciu badanych betonów. Największą wytrzymałością na ściskanie po 28 dniach dojrzewania (26,8 ÷ 29,9 MPa) charakteryzowały się betony o najmniejszej wartości współczynnika W/C i różnym dodatku szkła mielonego (betony oznaczone jako PW2, PW5 i PW8). Była ona większa od wytrzymałości betonu kontrolnego, tzn. bez dodatku szkła mielonego (PW7) o 7,0 – 10,1 MPa (35,4 – 51,0%). Natomiast najmniejszą wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach twardnienia osiągnęły betony (PW3 i PW6) o najwyższym współczynniku W/C. Ponadto parametry wytrzymałościowe pięciu badanych betonów (PW2, PW4, PW5, PW8 i PW10) odpowiadają wymaganiom stawianym klasie wytrzymałości C16/20. Warto również zauważyć, że betony oznaczone jako PW2 i PW5 osiągnęły już po 7 dniach dojrzewania zakładaną klasę wytrzymałości. W świetle zapisów dotyczących betonów przeznaczonych do wykonywania ław, na których układa się ścieki drogowe i krawężniki, zawartych w [23], tylko dwa betony (PW3 i PW6) nie uzyskały wymaganej minimalnej wytrzymałości na ściskanie. Z porównania wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach dojrzewania z wytrzymałością na ściskanie

po 28 dniach dojrzewania wynika, że w przypadku betonu kontrolnego przyrost wytrzymałości wyniósł 25,1%, a w przypadku betonu z dodatkiem szkła mielonego z recyklingu 30,5 – 51,9%. Przy identycznym stosunku wody do cementu można zaobserwować, że im większy jest udział dodatku szkła mielonego, tym większy przyrost wytrzymałości na ściskanie.

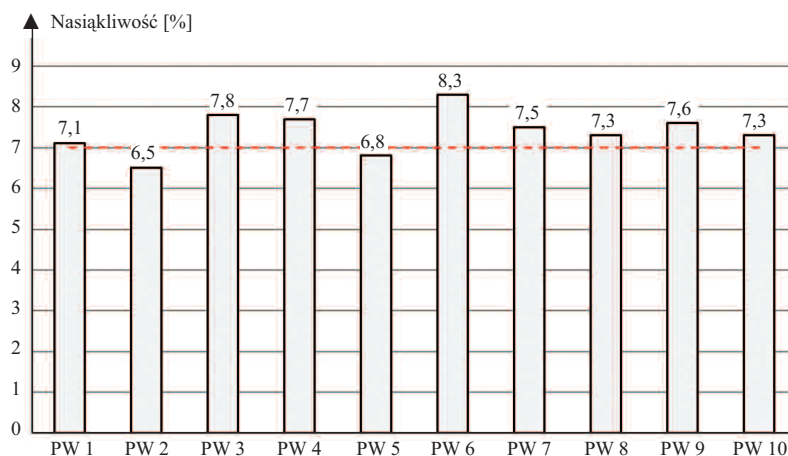
**Badania nasiąkliwości betonu** wykonano zgodnie z PN-B-06250:1988 [16]. W przypadku każdego składu betonu przygotowano po cztery próbki sześciennie o krawędzi 100 mm, które po 28 dniach dojrzewania w wodzie wysuszone w temperaturze 105°C do stałej masy. Następnie umieszczono próbki w pojemnikach z wodą i po pełnym nasyceniu ponownie zważono. Średnie z wyników badania nasiąkliwości

przedstawiono na rysunku 3. Linia przerywaną oznaczono wartość graniczną nasiąkliwości wg [10].

Spośród wszystkich badanych betonów tylko dwa (PW2 i PW5) spełniają wymaganie nasiąkliwości wg normy PN-S-96014:1997 [10] i wynoszą 6,5 ÷ 8,3% (średnio 7,4%). Najmniejszą nasiąkliwością wagową charakteryzuje się beton PW2, a największą PW6. Przy identycznym współczynniku w/c (0,8), betony oznaczone jako PW7-10, o różnicowanej zawartości szkła mielonego, odznaczają się porównywalną nasiąkliwością wagową. Natomiast betony PW1 i PW2, zawierające odpowiednio 6,6% i 38,4% szkła mielonego, charakteryzowały się przy identycznym współczynniku W/C = 0,75 różną nasiąkliwością.

**Badanie mrozoodporności** betonów wykonano zgodnie z PN-B-06250:1988 [16] metodą zwykłą. Dla każdego z betonów wykonano po 24 próbki sześciennie o krawędzi 100 mm. Próbki przechowywano w wodzie przez 28 dni. Następnie po 6 próbek każdego rodzaju betonu, po uprzednim zważeniu, poddano 25 cyklom zamrażania/rozmarzania. Natomiast pozostałe sześć próbek pozostawiono w wodzie. Po upływie 25 i 100 cykli zamrażania/rozmarzania próbki zważano i dokonano ich oceny wizualnej. Ostatnim etapem było określenie wytrzymałości na ściskanie wszystkich próbek.

Zgodnie z wymaganiami normy PN-B-06250:1988 [16], za mrozoodporny należy uznać beton, który charakteryzuje się ubytkiem masy nie większym niż 5% i spadkiem wytrzymałości na ściskanie nie większym niż 20%



Rys. 3. Nasiąkliwość badanych betonów

Fig. 3. Water absorption of the tested concrete mixes

w porównaniu z próbkami niepoddawanymi cyklem zamrażania. Ponadto na próbkach po cyklach zamrażania/rozmarzania nie mogą występować spękania. Wyniki badania mrozoodporności betonów zamieszczono w tabelach 4 i 5.

Wszystkie badane betony spełniły wymagania dotyczące mrozoodporności po 25 cyklach zamrażania i rozmrażania. W żadnym przypadku nie stwierdzono uszkodzeń powierzchni i krawędzi próbek betonu. Ubytki masy nie przekraczały 0,1% i były mniejsze od wartości granicznej  $\Delta G = 5\%$ . Nato-

**Tabela 4. Wyniki badania odporności betonów na zamrażanie i rozmrażanie w przypadku stopnia mrozoodporności F25**

Table 4. Results of the F25 freeze-thaw test carried out on the tested concrete mixes

Symbol mieszkanki	Kryteria oceny mrozoodporności betonu wg PN-B-06250:1988 [16]		
	średni spadek wytrzymałości próbek po badaniu $\Delta R$ [%]	średni ubytek masy próbek po badaniu $\Delta G$ [%]	ocena makroskopowa (obecność pęknięć)
PW1	5,9	0,04	brak
PW2	2,7	0,03	brak
PW3	1,0	0,05	brak
PW4	9,0	0,01	brak
PW5	2,0	0,04	brak
PW6	4,9	0,05	brak
PW7	2,3	0,08	brak
PW8	6,8	0,02	brak
PW9	1,5	0,06	brak
PW10	0,4	0,05	brak

**Tabela 5. Wyniki badania odporności betonów na zamrażanie i rozmrażanie w przypadku stopnia mrozoodporności F100**

Table 5. Results of the F100 freeze-thaw test carried out on the tested concrete mixes

Symbol mieszkanki	Kryteria oceny mrozoodporności betonu wg PN-B-06250:1988 [16]		
	średni spadek wytrzymałości próbek po badaniu $\Delta R$ [%]	średni ubytek masy próbek po badaniu $\Delta G$ [%]	ocena makroskopowa (obecność pęknięć)
PW1	8,6	-0,21	rysy włoskowate
PW2	5,6	-0,04	brak
PW3	22,5	-0,12	złuszczenia i odpryski
PW4	45,0	-0,92	pęknięcia
PW5	3,0	-0,06	brak
PW6	24,6	-0,33	rysy
PW7	24,1	-0,35	złuszczenia i rysy
PW8	5,0	-0,15	rysy włoskowate
PW9	12,3	-0,18	odpryski
PW10	10,5	-0,17	odpryski

miast zmniejszenie wytrzymałości próbek poddanych cyklem zamrażania i rozmrażania, w porównaniu z próbkami świadkami, wyniosło 0,4 – 9,0% i było mniejsze od wartości dopuszczalnej  $\Delta R = 20\%$ . Z kolei w próbkach poddanych 100 cyklom zamrażania/rozmarzania zaobserwowano przyrost masy średnio o 0,3%, a spadek wytrzymałości na ściskanie wyniósł 3,0 – 45,0%. Ocena wizualna nie wykazała żadnych zniszczeń tylko w przypadku dwóch badanych betonów – PW2 i PW5. Jednocześnie spełniają one wymagania dotyczące średniego spadku wytrzymałości i masy. Jedynie w betonie oznaczonym jako PW4 stwierdzono spękania. Beton ten charakteryzował się również największym średnim spadkiem wytrzymałości (aż 45%), natomiast w betonach oznaczonych jako PW3, PW6 i PW7 średni spadek wytrzymałości na ściskanie był większy niż 20%. Zatem nie spełniają one wymagań. W przypadku betonu PW1, PW8, PW9 i PW10 średni spadek wytrzymałości był mniejszy niż 20%, ale na próbkach zaobserwowano zniszczenia w postaci odprysków i rys włoskowatych. Beton kontrolny PW7 charakteryzuje się średnim spadkiem wytrzymałości większym niż dopuszczalna wartość graniczna.

**Określenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie** przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 480-11:2008 [17]. Próbki do badań o wymiarach 150 x 100 x 20 mm wycięto z uformowanych w laboratorium kostek sześciennych o boku 150 mm. Następnie próbki poddano procesowi szlifowania, polerowania i kontrastowania w celu uzyskania gładkiej powierzchni zglądu. Pomiar charakterystyki porów powietrznych wykonano metodą mikroskopową z wykorzystaniem komputerowego systemu automatycznej analizy obrazu. Do badania charakterystyki porów powietrznych wybrano cztery betony oznaczone jako PW5, PW7, PW8 i PW9.

Betony PW7, PW8 i PW9 wybrano w celu oceny wpływu dodatku szkła mielonego na charakterystykę porów przy jednakowym stosunku wodno-cementowym równym 0,80. Podjęto również próbę porównania rozkładu porów

w stwardniałym betonie przy identycznej średniej ilości szkła mielonego w betonie wynoszącej 22,5% w stosunku do masy cementu, ale przy różnym stosunku wodno-cementowym. W związku z tym wybrano beton oznaczony jako PW5.

Betony oznaczone jako PW5, PW8 i PW9 zawierają dodatek szkła mielonego i charakteryzują się dużą wytrzymałością na ściskanie oraz odpornością na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Natomiast beton oznaczony jako PW7 jest betonem kontrolnym, który nie zawiera dodatku szkła mielonego. Spełnia minimalnie wymagania związane z klasą wytrzymałości betonu, ale nie spełnia wymagania stopnia mrozoodporności F100. Najczęściej przyjmowanym parametrem do oceny mrozoodporności betonów jest rozstaw pęcherzyków L (średnia odległość do najbliższego pora powietrznego), który powinien być nie większy niż 0,2 mm. Innym równie ważnym parametrem jest minimalna zawartość powietrza w porach mniejszych niż 0,3 mm oznaczona jako  $A_{300}$ , która powinna wynosić przynajmniej 1,5%. Otrzymane średnie wartości badanych parametrów, wyznaczone wg normy [24], podano w tabeli 6. Niestety nie udało się przygotować próbek betonu kontrolnego PW7 do badania struktury porów powietrznych, gdyż podczas cięcia i szlifowania rozpadały się.

**Tabela 6. Średnie wartości parametrów charakteryzujących pory powietrzne i ich rozmieszczenie**

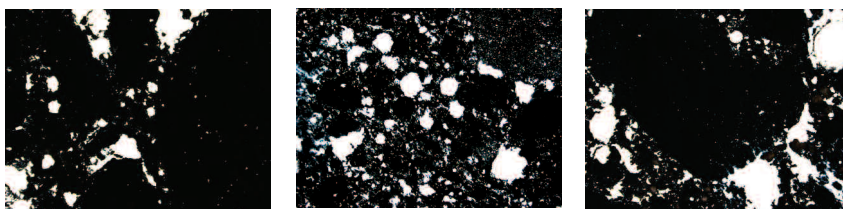
Table 6. The average values of the parameters characterizing air voids and their spacing

Parametr	PW5	PW8	PW9
Całkowita zawartość powietrza A [%]	16,58	10,85	18,20
Powierzchnia właściwa porów powietrznych $\alpha$ [ $\text{mm}^{-1}$ ]	18,73	21,93	22,13
Wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych L [mm]	0,09	0,11	0,07
Zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3 mm $A_{300}$ [%]	3,37	2,30	4,31

Analizując uzyskane wyniki rozmieszczenia porów powietrznych w betonach PW5, PW8 i PW9, stwierdzono, że spełniają one wymagania dotyczące betonu eksploatowanego w warunkach XF. Wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie wyniósł 0,07 – 0,11 mm, natomiast ich powierzchnia właściwa 18,7 – 22,1  $\text{mm}^{-1}$ . Otrzymano różniczo-

wane wyniki całkowitej zawartości powietrza w odróżnieniu od wyników badania zawartości powietrza w mieszance betonowej, określonej metodą ciśnieniową (5,8 – 13,2%). Całkowita zawartość powietrza w stwardniałym betonie wynosi 10,9 – 18,20% i prawdopodobnie wynika z niedostatecznego zagęszczenia próbek. Największą wartość współczynnika rozmieszczenia porów (L) oraz najmniejszą zawartość mikroporów ( $A_{300}$ ) wykazał beton PW8, zawierający największą ilość dodatku szkła mielonego. Przy jednakowym stosunku wodno-cementowym wynoszącym 0,80 stwierdzono, że w betonie PW8, wraz ze wzrostem ilości szkła mielonego (z 22,5% do 45,0%), nastąpił spadek całkowitej zawartości powietrza i mikroporów ( $A_{300}$ ). Natomiast w betonie oznaczonym jako PW5 o stosunku wodno-cementowym mniejszym niż w betonie PW9, ale przy identycznej zawartości dodatku szkła mielonego, obserwuje się mniejszą całkowitą zawartość powietrza i porów o średnicy poniżej 0,3 mm oraz powierzchnię właściwą porów ( $\alpha$ ). Na fotografii przedstawiono charakterystyczne obrazy mikrostruktury porów w badanych próbkach betonu.

**Wpływ mielonego szkła na wytrzymałość betonu na ściskanie i jego trwałość** zbadano, stosując analizę statystyczną i wykorzystano program Statistica [22]. W pierwszej kolejności wykonano sprawdzenie jednorodności wariancji za pomocą testu Bartletta. Na podstawie uzyskanych wartości statystyki F (krytycznego poziomu istotności p) wykazano jednorodność wariancji na poziomie istotności 0,05. Testy Levene'a i Browna-Forsythe'a również potwierdziły hipotezę o jednorodności wariancji. Następnie sprawdzono, czy wpływ wielkości wejściowych (W/C i GP/C) na wielkość wyjściową (wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania) jest istotny. Weryfikację przeprowadzono za pomocą testu F Snedecora (Fishera). Uzyskane wartości poziomu istotności p mniejsze od 0,05 świadczą o istotnym wpływie stosunku wodno-cementowego i dodatku szkła mielonego (wyrażony jako masowy stosunek jego zawartości do masy cementu) na wytrzymałość badanego betonu po 7 i 28 dniach dojrzewania. W dalszej części analizy staty-



Obraz mikrostruktury porów powietrznych w badanych próbkach betonu: a) PW5; b) PW8; c) PW9 (pory oznaczone kolorem białym). Układ porów spełnia wymagania  
The image of the microstructure of air voids in the analysed concrete specimens: a) PW5; b) PW8; c) PW9 (air voids marked with white). The air void spacing meets the requirements

stycznej, na podstawie danych uzyskanych w wyniku realizacji eksperymentu wg planu centralnego kompozycyjnego, opracowano model przedstawiający wpływ zmiennych niezależnych na wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania. Przyjęto wstępnie model liniowo-kwadratowy z interakcjami dwuczynnikowymi. W trakcie analizy uzyskanych wyników, prowadzonej w programie Statistica [22], eliminowano kolejno nieistotne składniki modelu. Ostatecznie analiza wykazała, że **największy wpływ na wytrzymałość badanego betonu ma masowy stosunek szkła mielonego do zawartości masy cementu, a następnie stosunek wodno-cementowy.**

Weryfikację funkcji regresji przeprowadzono na wartościach unormowanych dla funkcji obiektu badań w następującej postaci:

$$z = A_0 + A_1 \hat{x}_1 + A_2 \hat{x}_1^2 + A_3 \hat{x}_2 + A_4 \hat{x}_2^2 + A_5 \hat{x}_1 \hat{x}_2 \quad (1)$$

Stałe  $A_i$  (współczynniki regresji) obliczono metodą estymacji Gaussa-Newtona. Na podstawie istotności współczynników za pomocą testu t Studenta odrzucono współczynniki ( $A_2$ ,  $A_4$  i  $A_5$ ), które uznano za nieistotne przy poziomie istotności 0,05. W przypadku dwóch wielkości wejściowych (W/C i GP/C) można wykonać wykres poziomomicowy, który prezentuje powierzchnię odpowiedzi obiektu badań.

W przypadku badanych betonów otrzymano liniową zależność wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, zarówno od masowego stosunku szkła mielonego do zawartości masy cementu, jak i stosunku wodno-cementowego. Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej wyników badań właściwości mechanicznych zaobserwowano, że wzrost wytrzymała-

ści na ściskanie następował przy jednoczesnym zwiększaniu udziału szkła mielonego i zmniejszaniu stosunku wodno-cementowego. Badania potwierdzają podstawowe znaczenie stosunku wodno-cementowego na wytrzymałość na ściskanie. W badanym zakresie zmienności wpływu dodatku szkła mielonego z recyklingu i stosunku wodno-cementowego na trwałość (odporność na działanie mrozu) nie są one istotne statystycznie.

## Wnioski

Na podstawie wykonanych badań i analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że:

1) dodatek szkła mielonego z recyklingu do betonu niskich klas wytrzymałości, w porównaniu z betonem kontrolnym (PW7), przy identycznym stosunku wody do cementu:

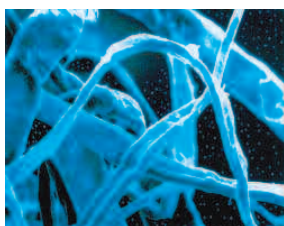
– zwiększa wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania o ok. 20% przy dodatku szkła mielonego w ilości 22,5% i o 40% przy dodatku w ilości 45%;

– nie wpływa na zwiększenie nasiąkliwości;

– zwiększa trwałość w warunkach agresji mrozowej (bez udziału środków odladzających), o czym świadczy spełnienie wymagań betonów oznaczonych jako PW8 – PW10 w przypadku stopnia F100;

2) badane betony, z wyjątkiem PW3 i PW6, spełniają wymagania [23] dotyczące zakładanej klasy wytrzymałości i mogą być stosowane do wykonania ław przy układaniu prefabrykowanych korytek ściekowych przy krawędzi nawierzchni dróg oraz krawężników na drogach krajowych;

3) beton oznaczony jako PW2 i PW5 spełnia jednocześnie wymagania polskiej normy PN-S-96014:1997 [10] dotyczące wytrzymałości na ściskanie,



## ARBOCEL – The Power of Reinforcement

– wyjątkowe włókna na bazie celulozy, redukujące ilość powstających rys/mikropęknięć i spękań tynków, szpachli i farb



Rettenmaier Polska

Sp. z o.o.

Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B

02-366 Warszawa

mobile +48 600 423 423

Tel + 48 22 608 51 00

e-mail: arbocel@jrs.pl

nasiąkliwości i mrozoodporności w przypadku stopnia F25 i może być stosowany do warstwy podbudowy nawierzchni dróg;

4) średnie parametry mikrostruktury porów powietrznych wg normy [24] w próbkach betonu oznaczonego jako PW5, PW8 i PW9 potwierdzają spełnienie wymagań dotyczących wskaźnika rozmieszczenia porów i zawartości mikroporów o średnicy poniżej 300  $\mu\text{m}$  w przypadku betonu eksploatowanego w środowisku agresywnym XF oraz korespondują z wynikami mrozoodporności.

Możliwa jest zatem produkcja betonu niskich klas wytrzymałości (do C20/25) z dodatkiem szkła mielonego jako wypełniacza, bez zmniejszania ilości cementu. Konieczna jest jednak weryfikacja sformułowanego wniosku podczas dalszych badań betonu wyższych klas wytrzymałości. Weryfikacja powinna obejmować przede wszystkim odporność betonu na działanie soli odładzających.

### Literatura

- [1] Drzymała T., B. Zegardło, P. Tofilo. 2020. „Properties of Concrete Containing Recycled Glass Aggregates Produced of Exploded Lighting Materials”. *Materials* 13: 3189.
- [2] Du H., K. H. Tan. 2017. „Properties of high volume glass powder concrete”. *Cement and Concrete Composites* 75: 22 – 29.
- [3] Kamali M., A. Ghahremaninezhad. 2015. „Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials”. *Construction and Building Materials* 98: 407 – 416.
- [4] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Załącznik do zarządzenia nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z 16.06.2014 r.
- [5] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych. Załącznik do zarządzenia nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z 16.06.2014 r.
- [6] Małek M., W. Łasica, M. Jackowski, M. Kadela. 2020. „Effect of Waste Glass Addition as a Replacement for Fine Aggregate on Properties of Mortar”. *Materials* 13 (3): 1 – 19.
- [7] Meena M. K., J. Gupta, B. Nagar. 2018. „Performance of concrete by using glass powder”. *International Research Journal of Engineering and Technology* 5 (9): 840 – 844.
- [8] Olofinnade O. M., A. N. Ede, J. M. Ndambuki, B. U. Ngene, I. Akinwumi, O. Ofuyatan. 2018. „Strength and microstructure of eco-concrete produced using waste glass as partial and complete replacement for sand”. *Cogent Engineering* 5 (1): 1483860.
- [9] Omran A. F., E. D. Morin, D. Harbec, A. Tagnit-Hamou. 2017. „Long-term performance of glass-powder concrete in large-scale field applications”. *Construction and Building Materials* 135: 43 – 58.
- [10] PN-S-96014:1997 Drogi samochodowe i lotniskowe. Podbudowa z betonu cementowego pod nawierzchnię ulepszoną. Wymagania i badania.
- [11] PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- [12] PN-EN 12350-7:2019-08 Badanie mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – metody ciśnieniowe.
- [13] PN-EN 12350-6:2019-08 Badania mieszanki betonowej – Część 6: Gęstość.
- [14] PN-EN 12390-3:2019 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [15] PN-EN 206: 2014-04 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [16] PN-B-06250:1988 Beton zwykły.
- [17] PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Metody badań – Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.
- [18] Serpa D., S. S. Silva, J. de Brito, J. Pontes, D. Soares. 2013. „ASR of mortars containing glass”. *Construction and Building Materials* 47: 489 – 495.
- [19] Sikora P., E. Horszczaruk, T. Rucińska, A. Straszyska. 2015. „Wpływ wysokiej temperatury na właściwości mechaniczne zapraw cementowych ze słuczką szklaną”. *Materiały Budowlane* 5: 116 – 118.
- [20] Sordoń-Kulibaba B. 2008. „Zagospodarowanie odpadów szkła i opakowań szklanych”. *Szkło i Ceramika*, Rocznik 59, 15-17.
- [21] Tamanna N., R. Tuladhar. 2020. „Sustainable Use of Recycled Glass Powder as Cement Replacement in Concrete”. *The Open Waste Management Journal* 13: 1 – 13.
- [22] TIBCO Software Inc. (2017). Statistica Version 13.
- [23] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych. D-08.01.01 Krawężniki betonowe. GDDKiA, Warszawa, 2019. Available online: [https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumenty-techniczne\\_8162/WWiORB/punkt%208/D-08.01.01\\_KRAWEŻNIKI%20BETONOWE\\_V01.pdf](https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumenty-techniczne_8162/WWiORB/punkt%208/D-08.01.01_KRAWEŻNIKI%20BETONOWE_V01.pdf) (data dostępu: 30 września 2020 r.).
- [24] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych. D-05.03.04 Nawierzchnia z betonu cementowego. GDDKiA, Warszawa, 2019. Available online: [https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumenty-techniczne\\_8162/WWiORB/punkt%205/D-05.03.04\\_NAWIERZCHNIA%20Z%20BETONU%20CEMENTOWEGO\\_V02.pdf](https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumenty-techniczne_8162/WWiORB/punkt%205/D-05.03.04_NAWIERZCHNIA%20Z%20BETONU%20CEMENTOWEGO_V02.pdf) (data dostępu: 30 września 2020 r.).
- [25] Zidol A. Z., M. T. Tognonvi, A. Tagnit-Hamou. 2017. „Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability”. *New Journal of Glass and Ceramic* 7: 34 – 47.

Przyjęto do druku: 05.10.2021 r.