

Dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych
Dyscyplina inżynieria lądowa, geodezja i transport

mgr inż. Filip Szmatuła

WPŁYW WYBRANYCH MATERIAŁÓW Z RECYKLINGU ODPADÓW NA WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH

Influence of selected materials from waste recycling
on the properties of cement composites

Opieka naukowa nad przygotowaniem rozprawy doktorskiej:

Promotor: dr hab. inż. Jacek Korentz, prof. UZ

Promotor pomocniczy: dr inż. Robert Jurczak

Rozprawę akceptuję: …….…….…….
…….…….…….

Zielona Góra, kwiecień 2026

STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM

Dynamiczny rozwój przemysłu cementowego i budownictwa wiąże się z wysoką emisją gazów cieplarnianych oraz znacznym zużyciem zasobów naturalnych. Jednocześnie wzrasta ilość wytwarzanych odpadów, w tym odpadów przemysłowych, które w wielu przypadkach mogą być ponownie wykorzystane jako surowce wtórne. W rozprawie doktorskiej podjęto problematykę zagospodarowania odpadów przemysłowych i komunalnych. Celem badań była kompleksowa ocena możliwości wykorzystania wybranych materiałów pochodzących z recyklingu odpadów w produkcji cementów, zapraw i betonów cementowych. Tematyka pracy wpisuje się w aktualne kierunki badań w budownictwie związane z ograniczaniem emisji dwutlenku węgla i zużycia surowców naturalnych oraz wdrażaniem zasad gospodarki o obiegu zamkniętym.

Program badawczy obejmował analizę wpływu odpadów pochodzących z recyklingu: żużla pomiedziowego, stłuczki szklanej, odpadów gumowych, kompozytów szklanych, a także włókien węglowych na właściwości mechaniczne, fizyczne oraz trwałość kompozytów cementowych. Odpady te analizowano pod kątem trzech głównych obszarów zastosowań: jako częściowy substytut cementu, zamienniki kruszyw drobnych i grubych oraz jako zbrojenie rozproszone. Sformułowane tezy badawcze zakładały, że zastosowanie materiałów pochodzących z recyklingu odpadów, jako częściowego zamiennika składników kompozytów cementowych, pozwala na uzyskanie materiałów o właściwościach mechanicznych i trwałościowych porównywalnych z kompozytami cementowymi o tradycyjnym składzie. Druga teza zakładała, że surowce pochodzące z recyklingu odpadów mogą pełnić funkcję pełnowartościowych składników kompozytów cementowych.

Badania eksperymentalne przeprowadzono zgodnie z obowiązującymi normami. Obejmowały one m.in. testy wytrzymałości na ściskanie i zginanie, gęstości, nasiąkliwości, mrozoodporności oraz trwałości. Analizowano także wpływ rodzaju odpadu, jego uziarnienia oraz udziału procentowego na parametry mieszanki i betonu. Uzyskane wyniki wykazały, że odpowiednio przygotowane i dozowane materiały odpadowe mogą skutecznie zastąpić część cementu lub kruszywa naturalnego bez istotnego pogorszenia właściwości mechanicznych. W przypadku niektórych modyfikacji zaobserwowano poprawę wybranych parametrów, takich jak odporność na spękania, mrozoodporność czy obniżoną gęstość kompozytu. Jednocześnie w celu uzyskania odpowiednich właściwości określono wartości graniczne udziału odpadów, których przekroczenie prowadziło do istotnego spadku wytrzymałości lub trwałości materiału. Przeprowadzono również ocenę wpływu rozdrobnienia materiałów odpadowych na aktywność pucolanową oraz właściwości zaczynu cementowego. Wykazano, że odpowiednie przygotowanie odpadu obejmujące suszenie, segregację i mielenie ma kluczowe znaczenie dla uzyskania powtarzalnych parametrów mechanicznych betonu.

Przeprowadzone badania i ich analizy potwierdziły zasadność stosowania badanych odpadów z recyklingu w technologii betonu, przy zachowaniu odpowiednich procedur przygotowania i kontroli jakości. Dodatkowo, rozprawa ma charakter aplikacyjny i wnosi istotny wkład w rozwój zrównoważonych technologii betonu. Wykonane badania oraz uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszych prac nad wdrażaniem materiałów pozyskanych z odpadów w produkcji wyrobów budowlanych, przyczyniając się do ograniczenia eksploatacji zasobów naturalnych oraz redukcji śladu węglowego sektora budowlanego.

STRESZCZENIE W JĘZYKU ANGIELSKIM

The dynamic development of the cement and construction industries is associated with high greenhouse gas emissions and significant consumption of natural resources. Simultaneously, an increasing volume of waste streams is being generated, particularly industrial by-products with potential for material recovery. This doctoral dissertation addresses the issue of industrial and municipal waste management. The aim of the performed research was to comprehensively assess the potential use of selected recycled materials in the production of cements, mortars, and cement-based concretes. The subject of the study aligns with current research trends in construction engineering focused on reducing carbon dioxide emissions, limiting the consumption of natural resources, and implementing the principles of the circular economy.

The research program included an analysis of the effects of recycled materials, namely copper slag, waste glass cullet, rubber waste, glass composites, as well as carbon fibers, on the mechanical, physical, and durability properties of cement composites. These materials were evaluated in three primary application areas: as partial cement replacements, as substitutes for fine and coarse aggregates, and as dispersed reinforcement. The research theses assumed that the incorporation of recycled waste materials, as partial replacements for conventional components of cement composites, would enable the production of materials with mechanical and durability properties comparable to those of traditional cement-based composites. It was also assumed that recycled materials could function as fully valuable constituents of cement composites.

Experimental investigations were conducted in accordance with relevant standards. They included tests of compressive and flexural strength, density, water absorption, freeze-thaw resistance, and durability. The influence of the type of waste material, its particle size distribution, and its percentage content on both fresh mix parameters and hardened concrete properties was analysed. The results demonstrated that properly prepared and dosed waste materials can effectively replace a portion of cement or natural aggregates without significant deterioration of mechanical properties. In some cases, improvements were observed in selected parameters, such as crack resistance, freeze-thaw resistance, and reduced composite density. Simultaneously, threshold values for the content of waste materials were identified, beyond which a significant decrease in strength or durability occurred. The study also evaluated the effect of waste material fineness on pozzolanic activity and the properties of cement paste. It was shown that appropriate pre-treatment of waste materials, including drying, sorting, and grinding, is crucial for achieving consistent mechanical performance of concrete.

The conducted research and its analysis confirmed the validity of using the investigated recycled waste materials in concrete technology, provided that appropriate preparation procedures and quality control are maintained. Furthermore, the dissertation has practical applicability and makes a significant contribution to the development of sustainable concrete technologies. The performed tests and obtained results provide a basis for further research on the implementation of waste-derived materials in the production of construction products, contributing to the reduction of natural resource exploitation and the carbon footprint of the construction sector.

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM **3**

STRESZCZENIE W JĘZYKU ANGIELSKIM **4**

1 Podstawa opracowania rozprawy doktorskiej **7**

1.1 Wykaz publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej 7

1.2 Wkład autora rozprawy w poszczególne publikacje 8

2 Wprowadzenie **9**

2.1 Geneza problemu badawczego 9

2.2 Tezy 9

2.3 Cel i zadania rozprawy 9

2.4 Zarys rozprawy doktorskiej 10

2.5 Metodologia 11

3 Stan wiedzy **12**

3.1 Cement 12

3.2 Kruszywo 13

3.3 Zbrojenie rozproszone z materiałów pochodzących z recyklingu 14

BADANIA EKSPERYMENTALNE **16**

4 Zastosowanie odpadów jako dodatków do cementu **16**

4.1 Badania właściwości cementów z dodatkiem mielonego szkła z recyklingu **[P3], [P5]** 16

4.2 Badania możliwości zastąpienia popiołów lotnych mielonym szkłem z recyklingu **[P4]** 19

4.3 Badania właściwości cementów z dodatkiem mielonego żużla pomiedziowego 21

5 Zastosowanie odpadów do modyfikacji składu ziarnowego zapraw i betonów **24**

5.1 Badania właściwości zapraw z dodatkiem rozdrobnionych włókien szklanych **[P6]** 24

5.2 Badania właściwości zapraw z dodatkiem pyłu z gumy SBR **[P1]** 26

5.3 Badania właściwości zapraw z dodatkiem drobnego kruszywa z żużla pomiedziowego 29

5.4 Badania właściwości zapraw z dodatkiem stłuczki szklanej z recyklingu 32

5.5 Badania właściwości betonów modyfikowanych grubym kruszywem pomiedziowym **[P2]** 35

5.6 Badania właściwości betonów z dodatkiem granulatu z gumy SBR **[P8]** 39

5.7 Badania właściwości betonów z dodatkiem stłuczki szklanej. 44

6 Zastosowanie odpadów jako zbrojenia rozproszonego w betonach **47**

6.1 Badania właściwości betonów z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w postaci włókien węglowych z recyklingu **[P7]** 47

6.2 Badania właściwości betonów z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w postaci ścieru gumowego z recyklingu 51

PODSUMOWANIE **56**

7 Wnioski **56**

8 Propozycje przyszłych badań **62**

WYKAZ LITERATURY **63**
WYKAZ TABEL **65**
WYKAZ RYSUNKÓW **65**
ZAŁĄCZNIKI **67**

Oświadczenia współautorów o wkładzie w przygotowane publikacje **68**
Artykuł [P1]. **76**
Artykuł [P2]. **80**
Artykuł [P3]. **89**
Artykuł [P4]. **95**
Artykuł [P5]. **105**
Artykuł [P6]. **120**
Artykuł [P7]. **124**
Artykuł [P8]. **143**

1 Podstawa opracowania rozprawy doktorskiej

W cyklu publikacyjnym realizowanym w ramach rozprawy doktorskiej uwzględniono osiem artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych z wykazu Ministerstwa Nauki. Kolejność artykułów wynika z kolejności prowadzonych badań oraz daty ich publikacji. Przedstawione publikacje tworzą spójny cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, koncentrujący się na analizie wpływu materiałów pochodzących z recyklingu odpadów na właściwości kompozytów cementowych. Wspólnym mianownikiem wszystkich prac było poszukiwanie rozwiązań umożliwiających zrównoważony rozwój technologii betonu, poprzez częściowe zastępowanie tradycyjnych surowców (cement, kruszywo) wtórnymi materiałami odpadowymi, co jest fundamentem zasad gospodarki o obiegu zamkniętym.

1.1 Wykaz publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej

Osiągnięcie naukowe zostało zaprezentowane w formie zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie poniższych artykułów naukowych:

[P1] Wpływ dodatku miału gumowego SBR na właściwości zapraw cementowych, 2020, Jacek Korentz, Filip Szmatuła, Materiały Budowlane, nr 12, 12--15, (pkt. 20), DOI: 10.15199/33.2020.12.02.

[P2] Właściwości betonu z dodatkiem kruszywa z żużla pomiedziowego = Properties of concrete with the addition of copper slag aggregate, 2020, Jacek Korentz, Robert Jurczak, Filip Szmatuła, Cement, Wapno, Beton, Vol. 25, nr 5, 367--375, (pkt. 40), DOI: 10.32047/CWB.2020.25.5.3. Cytowania wg Scopus: 4 [20-04-2026]. Cytowania wg WOS: 2 [20-04-2026].

[P3] Wpływ mielonego szkła z recyklingu na wytrzymałość i trwałość betonów o niskiej klasie wytrzymałości, 2021, Robert Jurczak, Filip Szmatuła, Tomasz Rudnicki, Jacek Korentz, Materiały Budowlane, nr 11, 41--46, (pkt. 100), DOI: 10.15199/33.2021.11.07. Cytowania wg Scopus: 1 [20-04-2026].

[P4] Evaluation of the Possibility of Replacing Fly Ash with Glass Powder in Lower-Strength Concrete Mixes, 2021, Robert Jurczak, Filip Szmatuła, Applied Sciences (Switzerland), Vol. 11, nr 1, 396, (pkt. 100), DOI: 10.3390/app11010396. Cytowania wg Scopus: 14 [20-04-2026]. Cytowania wg WOS: 12 [20-04-2026]. JIF: 2.838.

[P5] Effect of Ground Waste Glass Addition on the Strength and Durability of Low Strength Concrete Mixes, 2021, Robert Jurczak, Filip Szmatuła, Tomasz Rudnicki, Jacek Korentz, Materials, Vol. 14, nr 1, 1--15, (pkt. 140), DOI: 10.3390/ma14010190. Cytowania wg Scopus: 35 [20-04-2026]. Cytowania wg WOS: 32 [20-04-2026]. JIF: 3.748.

[P6] Właściwości zapraw cementowych z dodatkiem rozdrobnionego GFRP z recyklingu łopat turbin wiatrowych, 2023, Jacek Korentz, Filip Szmatuła, Materiały Budowlane, nr 11, 32--35, ISSN: 0137-2971, (pkt. 140), DOI: 10.15199/33.2023.11.07, Cytowania wg Scopus: 1 [20-04-2026].

[P7] Properties of FRC with Carbon Fibres from Recycled Wind Turbine Blades, 2025, Filip Szmatuła, Jacek Korentz, Polymers, Vol. 17, nr. 23, 3199, (pkt. 100), Cytowania wg Scopus: 0 [20-04-2026]. JIF: 4.900.

[P8] Assessment of the impact of SBR rubber waste on selected properties of cement concrete = Ocena wpływu odpadów gumowych SBR na wybrane właściwości betonu cementowego, 2025, Filip Szmatuła, Materiały Budowlane, Vol. 640, nr 12, 1--7, (pkt. 100), DOI: 10.15199/33.2025.12.01. Cytowania wg Scopus: 0 [20-04-2026].

Sumaryczny IF zgodnie z rokiem opublikowania: IF = 11,486. średni pięcioletni: IF5=11,486.
Sumaryczna punktacja zgodnie z rokiem wydania wg Rozporządzenia MNiSW: 740 pkt.
Wskaźnik Hirscha (baza Scopus): h-index = 3/3 (55/51 cytowania / bez autocytowań) [20-04-2026].
Wskaźnik Hirscha (baza WoS): h-index = 2/2 (46/41 cytowania / bez autocytowań) [20-04-2026].

1.2 Wkład autora rozprawy w poszczególne publikacje

Zakres wkładu autora rozprawy doktorskiej w przygotowanie i realizację publikacji naukowych zamieszczono w Tab. 1.

Tab. 1. Wkład autora w przygotowanie poszczególnych publikacji.

Wkład doktoranta w realizację i publikację artykułów naukowych*:	Numer artykułu wg wykazu publikacji w pkt. 1.1							
	[P1]	**[P2]**	**[P3]**	**[P4]**	**[P5]**	**[P6]**	**[P7]**	**[P8]**
Koncepcja i założenia badawcze	X (75/100)	X (75/100)	X (50/100)	X (50/100)	X (50/100)	X (50/100)	X (50/100)	X (100/100)
Przegląd literatury	X (75/100)	X (75/100)	X (40/100)	X (50/100)	X (30/100)	X (75/100)	X (50/100)	X (100/100)
Projektowanie metodologii	X (75/100)	X (75/100)	X (75/100)	X (100/100)	X (75/100)	X (100/100)	X (75/100)	X (100/100)
Zbieranie danych	X (100/100)	X (100/100)	X (75/100)	X (100/100)	X (75/100)	X (100/100)	X (100/100)	X (100/100)
Analiza danych	X (75/100)	X (75/100)	X (50/100)	X (75/100)	X (50/100)	X (75/100)	X (75/100)	X (100/100)
Interpretacja wyników	X (75/100)	X (75/100)	X (50/100)	X (50/100)	X (50/100)	X (75/100)	X (60/100)	X (100/100)
Pisanie oryginalnej wersji manuskryptu	X (25/100)	X (15/100)	X (25/100)	X (10/100)	X (25/100)	X (30/100)	X (25/100)	X (100/100)
Redakcja i korekta tekst	X (50/100)	X (25/100)	X (25/100)	X (50/100)	X (25/100)	X (50/100)	X (50/100)	X (100/100)
Wkład techniczny lub graficzny	X (75/100)	X (25/100)	X (25/100)	X (50/100)	X (25/100)	X (25/100)	X (60/100)	X (100/100)
Zarządzanie projektem	X (75/100)	X (75/100)	X (50/100)	X (50/100)	X (50/100)	X (75/100)	X (75/100)	X (100/100)
Pozyskanie finansowania	–	–	–	–	–	X (50/100)	X (50/100)	X (100/100)
Ogólny udział doktoranta	60%	55%	40%	50%	40%	70%	60%	100%

*Koncepcja i założenia badawcze – opracowanie głównej idei i celów pracy badawczej; Przegląd literatury – zebranie, analiza i interpretacja istniejących publikacji; Projektowanie metodologii – dobór metod badawczych i narzędzi analitycznych; Zbieranie danych – przeprowadzenie eksperymentów, badań laboratoryjnych, analiz; Analiza danych – opracowanie wyników, wykorzystanie statystyki, modelowanie, prezentacja rezultatów; Interpretacja wyników – omówienie znaczenia uzyskanych rezultatów; Pisanie oryginalnej wersji manuskryptu – przygotowanie pierwszej wersji artykułu; Redakcja i korekta tekstu – poprawki merytoryczne i językowe, formatowanie; Wkład techniczny lub graficzny – przygotowanie wykresów, tabel, schematów; Zarządzanie projektem – koordynacja pracy zespołu, harmonogramów i zasobów; Pozyskanie finansowania – przygotowanie wniosków o finansowanie, budżetowanie.
„X (xx/100)" Udział procentowy doktoranta w realizacje danej czynności w stosunku do pozostałych autorów, „–"doktorant nie realizował czynności.

Opracowanie własne.

Udział autora rozprawy w przygotowaniu wymienionych publikacji zmienia się w granicach od 40% do 100%, natomiast średni udział autora to 59%. Oświadczenia współautorów o ich procentowym wkładzie zamieszczone są w załączniku do pracy.

2 Wprowadzenie

2.1 Geneza problemu badawczego

Dynamiczny rozwój budownictwa wymaga wykorzystania znacznych ilości zasobów naturalnych, a rosnące zapotrzebowanie na cement prowadzi do dalszego zwiększenia, już i tak bardzo dużej, emisji dwutlenku węgla związanej z jego produkcją.

Zastąpienie składników betonu i modyfikacja jego właściwości poprzez zastosowanie materiałów odpadowych i surowców wtórnych przynosi wymierne korzyści w zakresie ochrony zasobów naturalnych oraz środowiska. Ma to też wpływ na obniżenie ilości produkowanych gazów cieplarnianych. Dotychczasowe badania koncentrują się na możliwości częściowego zastąpienia cementu odpadami o właściwościach pucolanowych, zastąpieniu kruszywa naturalnego kruszywami z recyklingu oraz modyfikacji właściwości mechanicznych betonu zbrojeniem rozproszonym. Cementy zawierające dodatki mineralne oraz surowce wtórne pochodzące z recyklingu stosowane w technologii betonu, stanowią obecnie istotny obszar zainteresowania producentów cementu i środowiska naukowego. Podejście to, przynosi korzyści ekologiczne i ekonomiczne. Korzyści te wynikają z ograniczenia udziału klinkieru w składzie cementu poprzez częściowe jego zastąpienie dodatkami mineralnymi, w tym odpadami przemysłowymi. Można tu wspomnieć m.in. o oszczędności energii, zmniejszeniu emisji CO_2, redukcji zużycia naturalnych surowców mineralnych, zagospodarowaniu i utylizacji odpadów przemysłowych lub uzyskaniu materiałów o zmodyfikowanych właściwościach.

Efektywne wykorzystanie zasobów naturalnych, ograniczenie wytwarzania odpadów, a co za tym idzie i ich ponowne wykorzystanie stanowią kluczowe działania na rzecz zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska w Polsce i na świecie.

2.2 Tezy

W rozprawie doktorskiej podjęto problematykę wykorzystania odpowiednio przetworzonych odpadów w kompozytach cementowych stosowanych w budownictwie. Główne ograniczenia w ich wykorzystaniu wynikają z dużej różnorodności oraz trudności w zapewnieniu wystarczających ilości materiału o powtarzalnych właściwościach. Jednorodność odpadów jest niezbędna do zapewnienia stabilnych właściwości fizycznych, mechanicznych i chemicznych uzyskanych materiałów budowlanych.

W pracy postawiono następujące tezy:

1. Zastosowanie materiałów pochodzących z recyklingu odpadów jako częściowego zamiennika składników kompozytów cementowych pozwala na uzyskanie materiałów o właściwościach mechanicznych i trwałościowych porównywalnych z kompozytami cementowymi o tradycyjnym składzie.

2. Surowce pochodzące z recyklingu odpadów mogą pełnić funkcję pełnowartościowych składników kompozytów cementowych.

2.3 Cel i zadania rozprawy

Celem pracy jest określenie optymalnego poziomu dozowania materiałów odpadowych pełniących rolę substytutu cementu, kruszywa lub zbrojenia rozproszonego, przy których możliwe jest zachowanie lub uzyskanie właściwości porównywalnych z kompozytami tradycyjnych. Możliwy kompromis pomiędzy ewentualnym obniżeniem wybranych parametrów wytrzymałościowych a poprawą innych właściwości użytkowych, takich jak: gęstość, izolacyjność cieplna czy

mrozoodporność jest ważnym celem przeprowadzonych badań. W pracy przedstawiono wyniki badań dla czterech grup materiałów budowlanych obejmujących:

- Cementy. W tym zakresie przeanalizowano możliwość stosowania dodatków do cementów w postaci następujących odpadów: mielony żużel pomiedziowy, mielone szkło z recyklingu opakowań, włókna szklane z recyklingu łopat turbin wiatrowych.
- Zaprawy. W tej grupie przeanalizowano możliwość zastosowania odpadów w postaci: drobnego kruszywa z żużla pomiedziowego, stłuczki szklanej, pyłu z gumy SBR, pyłu z włókien szklanych.
- Betony cementowe. W tej grupie przeanalizowano możliwość zastosowania odpadów w postaci: drobnego i grubego kruszywa z żużla pomiedziowego, stłuczki szklanej i granulatu z gumy SBR.
- Fibrobetony. Analizie poddano możliwość zastosowania odpadów w postaci: ścieru gumowego SBR i włókien węglowych.

Kluczowym celem rozprawy jest ich ilościowa ocena. Realizacja celów postawionych w rozprawie wymagała oceny wpływu wybranych materiałów odpadowych na właściwości mechaniczne, fizyczne i użytkowe kompozytów cementowych.

2.4 Zarys rozprawy doktorskiej

Praca doktorska rozpoczyna się streszczeniem w języku polskim oraz angielskim, które syntetycznie przedstawia ideę badań, ich znaczenie oraz kontekst naukowy. Zawiera wykaz osiągnięć naukowych oparty na zbiorze artykułów wraz z dokładnym opisem wkładu autora, stanowiących spójny cykl powiązanych tematycznie publikacji.

Rozdział drugi, „Wprowadzenie", stanowi podstawę merytoryczną pracy. Opisuje genezę problemu badawczego, tezę postawioną przez autora, cele i zadania rozprawy oraz zarys rozprawy doktorskiej. Punkt „Metodologia" przedstawia założenia doboru norm PN-EN, celem jednoznacznego powiązania metod z odpowiednimi grupami materiałów (cementy, zaprawy, betony).

Rozdział trzeci zawiera przegląd literatury technicznej, podzielony według kluczowych komponentów betonu: cement, kruszywo, zbrojenie rozproszone. Omówiono ilość produkowanych odpadów, emisję CO_2, konieczność dekarbonizacji przemysłu cementowego oraz potrzebę recyklingu materiałów odpadowych. Struktura podrozdziałów opiera się na aktualnych danych liczbowych dotyczących przemysłu cementowego oraz kruszywowego.

Badania eksperymentalne stanowią zasadniczą część rozprawy – obszerna prezentacja badań eksperymentalnych została przedstawiona w trzech rozdziałach:

1. Zastosowanie odpadów jako dodatków zastępujących cement,
2. Zastosowanie odpadów do modyfikacji składu ziarnowego zapraw i betonów,
3. Zastosowanie odpadów jako zbrojenie rozproszone z materiałów z recyklingu.

Podsumowanie to fragment pracy zawierający wnioski końcowe, podsumowanie wraz z oceną realizacji założonych tez i celów badawczych. Rozdział ten zawiera także kierunki dalszych badań. Wskazano na ograniczenia oraz trudności związane ze skalowaniem i jednorodnością materiałów odpadowych, co podkreśla wyzwania techniczne oraz potrzebę kompleksowej oceny możliwości stosowania odpadów do produkcji materiałów budowlanych.

W końcowej części pracy przedstawiono bibliografię, wykaz tabel i rysunków oraz wykaz załączników, będących artykułami naukowymi wchodzącymi w zakres cyklu publikacji, a także oświadczenia autora oraz współautorów o ich indywidualnym wkładzie.

2.5 Metodologia

W badaniach cechy lub właściwości danego odpadu, a przede wszystkim właściwości kompozytów cementowych stosowano aktualnie obowiązujące normy badawcze PN-EN lub EN, zgodne z europejskim systemem normalizacji. W niektórych publikacjach i opracowanych rozdziałach, ze względu na wieloletni charakter prowadzonych badań, można znaleźć odwołania do polskich norm budowlanych obowiązujących w czasie realizacji poszczególnych etapów badań.

Szczegółowy opis zastosowanych procedur badawczych oraz metod oznaczania analizowanych właściwości przedstawiono w publikacjach poświęconych badaniom dla poszczególnych grup odpadów. Każda z tych grup charakteryzuje się odmiennymi właściwościami materiałowymi, co może skutkować zarówno korzystnym wpływem na wybrane cechy zapraw (np. konsystencję, wytrzymałość), jak i jednoczesnym pogorszeniem parametrów (np. gęstość, nasiąkliwość). Zróżnicowane oddziaływanie tych samych materiałów odpadowych w zależności od ich zastosowania jest powszechnie obserwowanym zjawiskiem.

Możliwość wykorzystania odpadów wynika z ich specyficznych właściwości materiałowych oraz zamierzonych efektów technologicznych, które można osiągnąć przy ich zastosowaniu w przemyśle budowlanym. Kluczowe znaczenie mają również miejsca zastosowania kompozytów cementowych, warunki środowiskowe oraz specyficzne warunki eksploatacji, które istotnie wpływają na trwałość materiałów.

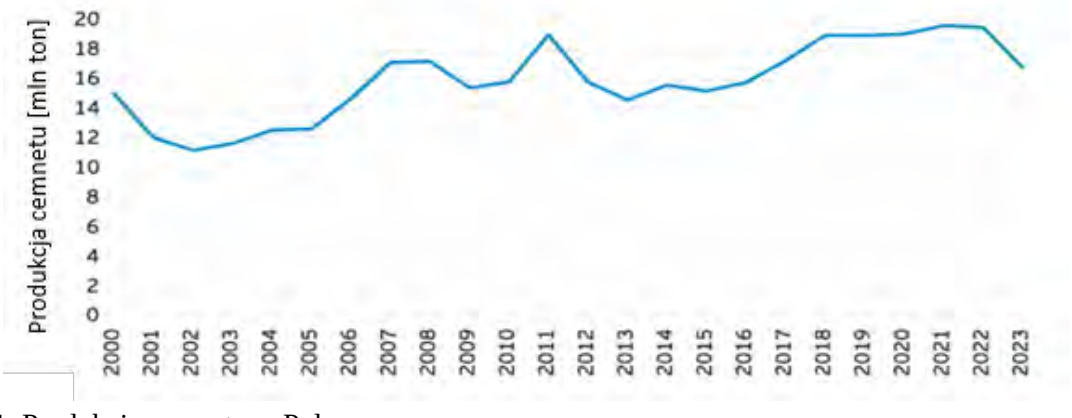
Złożoność problematyki związanej z wykorzystaniem odpadów w produkcji materiałów budowlanych, przy jednoczesnym spełnieniu wszystkich wymagań normowych, generuje liczne wyzwania techniczne. Konieczne jest uwzględnienie wielu możliwych oddziaływań stosowanych odpadów na właściwości materiału końcowego. Z tego względu zagadnienie to ma charakter wieloaspektowy i wymaga indywidualnego podejścia badawczego.

Wiele materiałów odpadowych nadaje się do ponownego wykorzystania w przemyśle budowlanym, przy czym część z nich wymaga odpowiedniego przygotowania w celu uzyskania jednorodności oraz stabilności składu finalnego półproduktu. Istotną grupę stanowią również odpady, które mogą być wykorzystane bez konieczności ponoszenia znaczących nakładów czasowych i energetycznych na ich przetwarzanie.

3 Stan wiedzy

3.1 Cement

Cement jest używany głównie do produkcji betonu i zapraw. Jest drugim po wodzie najczęściej używanym materiałem na świecie. Podstawowym półproduktem w procesie produkcji cementu jest klinkier. Podstawowymi surowcami stanowiącymi składniki klinkieru są cztery tlenki: tlenek wapniowy, krzemionka, tlenek glinu i tlenek żelaza. Głównym źródłem tych tlenków są surowce węglanowe (wapienie, margle) i surowce ilaste (gliny, łupki), eksploatowane w kopalniach odkrywkowych zlokalizowanych najczęściej ze względów ekonomicznych w pobliżu cementowni. W produkcji cementu stosuje się dodatki mające na celu wzbogacenie materiałów przed trafieniem do pieca obrotowego. Dodatkami tymi są najczęściej żużle wielkopiecowe, piaski, łupki ilaste, popioły lotne lub inne dodatki organiczne i nieorganiczne. Po wypaleniu materiały są poddawane mieleniu w bębnach obrotowych. Proces wytwarzania cementu jest wieloetapowy. Można wymienić kilka głównych etapów produkcji klinkieru: wydobycie surowca, jego transport, rozdrabnianie, prehomogenizacja, składowanie surowców, przemiał surowców, homogenizacja mączki piecowej/surowcowej, wypalanie cementu, przemiał cementu, pakowanie i spedycja cementu [1]. Proces produkcji cementu z uwagi na metody wytwarzania cementu i długą ścieżkę produkcji jest energochłonny. Przy produkcji cementu powstaje duża ilość CO_2. Produkcja cementu odpowiada za 7–8% globalnej emisji CO_2 [1]. Obecnie wprowadzono szereg rozwiązań technologicznych mających na celu redukcję energochłonności i emisji gazów cieplarnianych do atmosfery powstałych w wyniku produkcji cementu. Ochrona zasobów naturalnych oraz racjonalne gospodarowanie nimi to cele Gospodarki Obiegu Zamkniętego (GOZ). Uboczne produkty spalania węgla podlegają regulacjom, które umożliwiają wprowadzanie ich do obrotu handlowego. W Europie wytwarza się około 700 mln ton minerałów antropogenicznych rocznie, w tym około 150 mln ton ubocznych produktów spalania węgla. Z tej ilości ponad 100 mln ton pochodzi z 28 krajów członkowskich Unii Europejskiej, a ponad 20 mln ton z Polski [2]. Produkty te są wykorzystywane głównie jako surowce do produkcji cementu, spoiw i betonu, a także jako kruszywa oraz wypełniacze w budownictwie. Spełnianie wymogów norm technicznych, zarówno europejskich, jak i krajowych, dotyczących poszczególnych zastosowań, jest kluczowym warunkiem wykorzystywania ubocznych produktów spalania węgla w obszarach materiałowych i/lub produktowych. Na Rys. 1 przedstawiono wykres zmian wielkości produkcji cementu w Polsce w latach 2000 – 2023.



Rys. 1. Produkcja cementu w Polsce.
Źródło: GUS Produkcja wyrobów przemysłowych, wykres z [1].

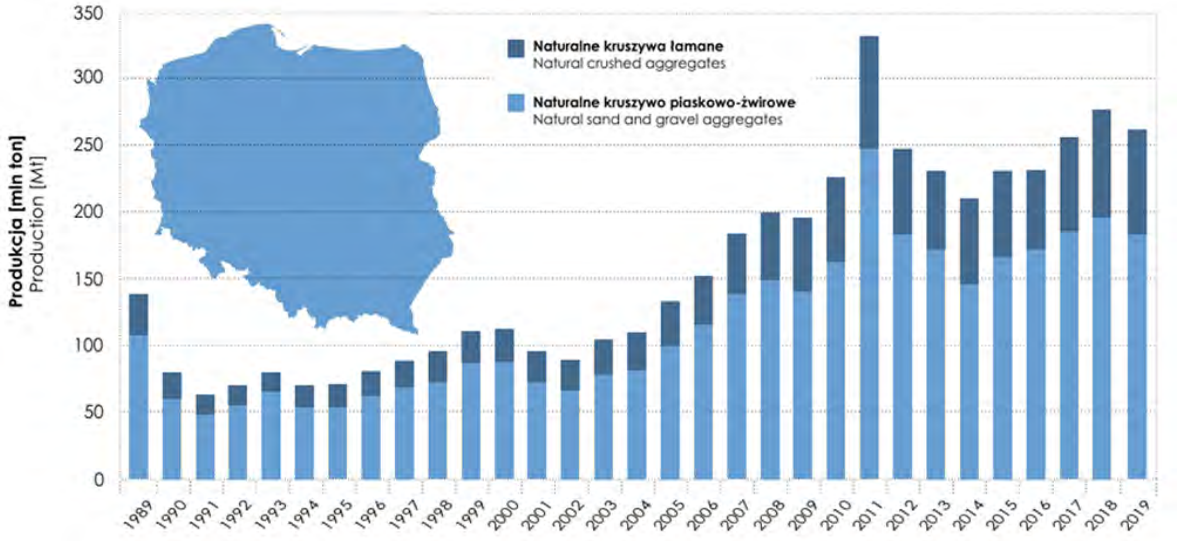
Zmniejszenie emisji CO_2 ma być osiągalne poprzez stosowanie surowców zdekarbonizowanych, paliw alternatywnych z biomasą, większej efektywności energetycznej, zamianę paliw na wodór i energię elektryczną, stosowanie nowego rodzajów cementu (niskoemisyjnego) i wdrożenie technologii Carbon Capture and Storage/Utilization (CCS/U). Technologia CCS/U polega na wychwytywaniu

dwutlenku węgla z procesów produkcyjnych i jego magazynowaniu w strukturach geologicznych lub wykorzystaniu w nowych produktach. Obok innowacji technologicznych konieczne będzie także zwiększenie recyklingu betonu, projektowanie konstrukcji o mniejszym zapotrzebowaniu na cement.

Z uwagi na konieczność zatrzymania zmian klimatu oraz regulacje prawne z tym związane, również inne branże wprowadzają znaczne ograniczenia emisji CO_2 i redukcji energochłonności procesów. Wynikiem transformacji wielu sektorów gospodarki mogą być duże ograniczenia w dostępności popiołów lotnych i żużli wielkopiecowych. Dlatego branża cementowa i badacze na całym świecie od lat starają się poszukiwać nowych zastępczych materiałów pozwalających zmniejszyć udział klinkieru w cemencie. Obecnie wprowadza się do cementów substytuty w postaci materiałów o właściwościach pucolanowych. Prowadzone są badania nad możliwością wprowadzania do betonu wypełniaczy w postaci krzemionkowych popiołów lotnych. Trwają prace nad badaniem przydatności mączek granitowych [3], naturalnych pucolan (takich jak tufy wulkaniczne i zeolity), naturalnych i kalcynowanych minerałów gliniastych, osadów z oczyszczalni ścieków, osadów wapiennych, meatakolinu, popiołów wulkanicznych, związków wapnia, krzemionki i aluminium, wprowadza się również nanokrzemionkę oraz mikrokrzemionkę [4], [5], [6].

3.2 Kruszywo

Kruszywa naturalne są wydobywane ze złóż naturalnych np. żwiry, piaski. Źródłem kruszyw naturalnych są także skały macierzyste, a kruszywo jest pozyskiwane przez mechaniczne odspojenie i kruszenie na odpowiednie frakcje, np. grysy granitowe, bazaltowe. Właściwości kruszyw są bezpośrednio związane z jakością i trwałością skały macierzystej oraz są wypadkową następujących cech: składu chemicznego skały, składu mineralnego, rozkładu i wielkości porów wewnątrz struktury, wytrzymałością skały i jej twardością. Głównym zadaniem kruszywa jest nadanie betonowi odpowiedniej wytrzymałości, trwałości i objętości, a także zmniejszenie jego skurczu. Stosowanie innowacyjnych betonów zawierających kruszywa pochodzące z recyklingu pozwala z jednej strony na organicznie odpadów i ochronę zasobów naturalnych z drugiej. Na Rys. 2 przedstawiono dane z produkcja kruszyw mineralnych w Polsce.



Rys. 2. Produkcja kruszyw mineralnych w Polsce od roku 1989.
Źródło: bilans zasobów złóż kopalin, 1989–2019 [7].

Kruszywa sztuczne (przetworzone) powstają w wyniku procesów przemysłowych, obejmujących termiczną obróbkę surowców mineralnych np. keramzyt, żużel wielkopiecowy, pumeks hutniczy, łupkoporyt, glinoporyt, węglanoporyt, powstały one jako produkt określonego procesu, np. wypalania, spiekania, a następnie zostały poddane najwyżej obróbce mechanicznej.

Kruszywa z recyklingu to produkty pochodzenia mineralnego, uzyskane w wyniku przeróbki nieorganicznych materiałów zastosowanych poprzednio w budownictwie np. beton, nawierzchnia betonowa, ceramika, cegły lub inne. Zastępując kruszywa naturalne kruszywami z recyklingu pozyskanymi z rozbiórki, ogranicza się negatywny wpływ na środowisko, jednocześnie przyczynia się do zmniejszenia ilości odpadów budowlanych. Kruszywa z recyklingu znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie, m.in. przy budowie oraz modernizacji dróg, poboczy drogowych, mogą stanowić podbudowy pod drogi, wykorzystywane są w utwardzaniu terenu pod budynki wielkopowierzchniowe, place składowe, drogi technologiczne czy jako podbudowa i podsypka przy układaniu np. kostki brukowej.

Na całym świecie prowadzi się rozpoznanie w kierunku poszukiwania materiałów mogących zastąpić kruszywa naturalne w betonie, głównie z powodów środowiskowych i ograniczonych zasobów. Do najczęściej stosowanych należą odpady przemysłowe (żużle hutnicze, żużle pomiedziowe [8]), kruszywa z recyklingu (gruz betonowy, ceramiczny, ceglany [9]) oraz kruszywa sztuczne (np. keramzyt). Materiały te wykorzystywane są w budownictwie infrastrukturalnym i prefabrykacji czy podczas druku 3D betonu. Prowadzone są również badania nad możliwością wykorzystania piasków morskich [10], kruszyw magnetytowych [11], kruszywa żelazofosforowego, kruszywa wapiennego, kruszywa dolomitowe, lawy i skały piroklastyczne czy sztucznego kruszywa z żużla fosforowego, szkło z odpadów, odpady ceramiczne i wiele innych.

Na tle pozostałych krajów europejskich i światowych, Polska zajmuje pozycję jednego z czołowych producentów kruszyw mineralnych. W skali europejskiej znajduje się na czwartym miejscu pod względem produkcji kruszyw żwirowo-piaskowych, łamanych, pochodzących z recyklingu oraz wytwarzanych kruszyw sztucznych. Według danych europejskich udział Polski w całkowitym wydobyciu kruszyw mineralnych przekracza 7%.

3.3 Zbrojenie rozproszone z materiałów pochodzących z recyklingu

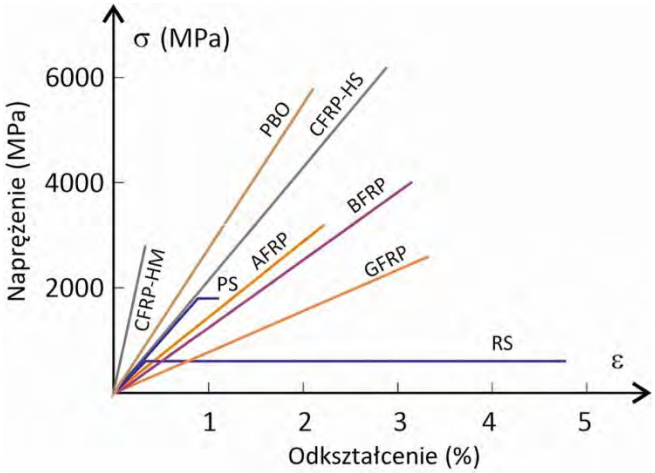
Fibrobeton jest to kompozyt cementowy ze zbrojeniem rozproszonym w postaci włókien metalicznych (np. stalowych) bądź niemetalicznych (np. z tworzyw sztucznych lub roślin, ze szkła, bazaltu). Zbrojenie rozproszone w betonie stosuje się w celu zwiększenia jego odporności na pękanie i ograniczenie rys skurczowych, poprawy wytrzymałości na rozciąganie i zginanie, zwiększenia odporności na uderzenia i ścieranie, zwiększa zwiększenia trwałość w warunkach cyklicznego zamarzania i rozmrażania. Włókna wykorzystuje się w betonach przeznaczonych do posadzek przemysłowych, nawierzchni drogowych, płyt lotniskowych, torkretu, elementów małej architektury i betonów wysokowartościowych, a także obudów tuneli, elementów elewacyjnych czy nawierzchni.

W przeciwieństwie do konwencjonalnych prętów zbrojeniowych, które są specjalnie zaprojektowane i umieszczone w strefie rozciągania elementu, włókna zbrojenia rozproszonego są cienkie i krótkie, a ich rozmieszczenie w elemencie betonowym jest losowe.

Ze względu na długość rozróżnia się mikro- i makrowłókna. Włókna dłuższe mają zdolność przenoszenia obciążeń działających na konstrukcje, dzięki czemu mogą pełnić funkcję konstrukcyjną, a tym samym zastępować tradycyjne zbrojenie prętowe. Mikrowłókna mostkują mikropęknięcia, które pojawiają się w betonie. Są bardziej efektywne od makrowłókien, ponieważ przy tej samej objętości ich liczba jest większa.

Właściwości mechaniczne kompozytów z włókien wzmocnionych (FRP) różnią się znacznie w zależności od rodzaju zastosowanego włókna. Rys. 3 przedstawia porównanie krzywej naprężenie-odkształcenie różnego rodzaju kompozytów FRP oraz stali sprężającej (PS) i stali zbrojeniowej (RS). Należy zwrócić uwagę na bardzo wysoką wytrzymałość na rozciąganie i niski moduł sprężystości większości kompozytów FRP.

Do betonu coraz częściej wprowadza się również włókna pochodzące z recyklingu, które poprawiają jego właściwości mechaniczne i jednocześnie pozwalają zagospodarować odpady. Badacze z całego świata prowadzą intensywne prace mające na celu ocenę możliwości zastosowania w betonie cementowym różnego rodzaju odpadów z recyklingu spełniających funkcję zbrojenia rozproszonego. Są one ukierunkowane na zastosowanie takich włókien jak włókna stalowe z recyklingu opon samochodowych [12],[13], włókna polipropylenowe z recyklingu tworzyw sztucznych m.in. z łopat turbin wiatrowych [14], [15] włókna szklane z recyklingu szkła [16],[17], włókna węglowe z recyklingu kompozytów [17], polipropylenowe i kewlarowe, poliestrowe, bazaltowe [18], [19] włókna naturalne z roślin, odpadów rolniczych lub przemysłowych [20], [21], [22] (różne np. włókna kokosowe, włókna konopne, a także włókna kenafu, włókna jutowe, włókna sizalowe, włókna bawełniane, włókna bambusowe). Wykorzystanie włókien z recyklingu to obecnie jeden z kierunków badań nad zrównoważonym betonem, jego wpływem na środowisko i możliwości oraz sposobami na ograniczenie śladu węglowego.



Rys. 3. Właściwości mechaniczne wybranych włókien stosowanych w betonach cementowych. *Opracowanie własne.*

BADANIA EKSPERYMENTALNE

4 Zastosowanie odpadów jako dodatków do cementu

Niniejszy rozdział poświęcono analizie możliwości wykorzystania dodatków zastępujących częściowo cement, wytwarzanych na bazie sproszkowanych lub zmielonych odpadów. Kluczowym elementem oceny przydatności analizowanych dodatków jest charakterystyka ich właściwości fizycznych, chemicznych oraz mechanicznych, determinujących aktywność pucolanową.

Przedstawione rozważania mają na celu wskazanie potencjału aplikacyjnego analizowanych materiałów odpadowych w technologii cementu, z uwzględnieniem zarówno aspektów wytrzymałościowych, jak i trwałościowych, przy jednoczesnym zachowaniu wymagań normowych dla spoiw cementowych.

4.1 Badania właściwości cementów z dodatkiem mielonego szkła z recyklingu [P3], [P5]

W rozdziale przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań nad możliwością zastosowania cementu z dodatkiem mielonego szkła z recyklingu w betonach cementowych klasy C12/15, które stosuje się powszechnie w budownictwie drogowym, w szczególności do wykonywania betonów niekonstrukcyjnych np. do ław pod prefabrykowane korytka ściekowe oraz krawężniki betonowe, podsypki pod kostkę kamienną lub podbudowy pod przepusty drogowe na drogach krajowych lub drogach niższych klas. Popiół lotny i żużel mogą wkrótce stać się niedostępne ze względu na ograniczenia produkcji energii w elektrowniach spalających węgiel. Uzasadnione jest więc poszukiwanie alternatywnych materiałów drobnoziarnistych mogących je zastąpić, np. szkło odpadowe, które wymaga jedynie oczyszczenia z zanieczyszczeń organicznych i przekruszenia na odpowiednie frakcje.

Modyfikacja cementu polegała na wprowadzeniu mielonej stłuczki szklanej (Rys. 4) jako dodatku mineralnego pełniącego rolę wypełniacza o właściwościach potencjalnie pucolanowych, bez jednoczesnego zmniejszenia ilości cementu portlandzkiego w mieszance. Celem było oznaczenie wpływu dodatku na właściwości mechaniczne cementu. Surowcem wyjściowym były oczyszczone i wysuszone butelki szklane koloru brązowego, które rozdrobniono a następnie zmielono. Powierzchnia właściwa mielonego szkła wynosiła 4180 cm^2/g, gęstość właściwa mielonego szkła wynosiła 2501 kg/m^3.

Badania przeprowadzono zgodnie z dwuczynnikowym planem eksperymentalnym, w którym zmiennymi niezależnymi były: współczynnik woda/cement (W/C) w zakresie 0,73 ÷ 0,87 oraz udział szkła mielonego (GP/C) w stosunku masowym do cementu w zakresie 0% ÷ 45%. Przygotowano 10 serii betonów o zróżnicowanych kombinacjach W/C i GP/C. Do produkcji mieszanki użyto cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, piasku płukanego (0/2 mm) i żwiru (2/8 mm i 8/16 mm). Zakresem badań objęto: oznaczenie konsystencji, zawartości powietrza i gęstości mieszanki betonowej oraz wytrzymałość na ściskanie po 7 i 28 dniach, nasiąkliwość, mrozoodporność (po 25 i 100 cyklach zamrażania /rozmrażania) a także mikroskopową analizę porów powietrznych w stwardniałym betonie.



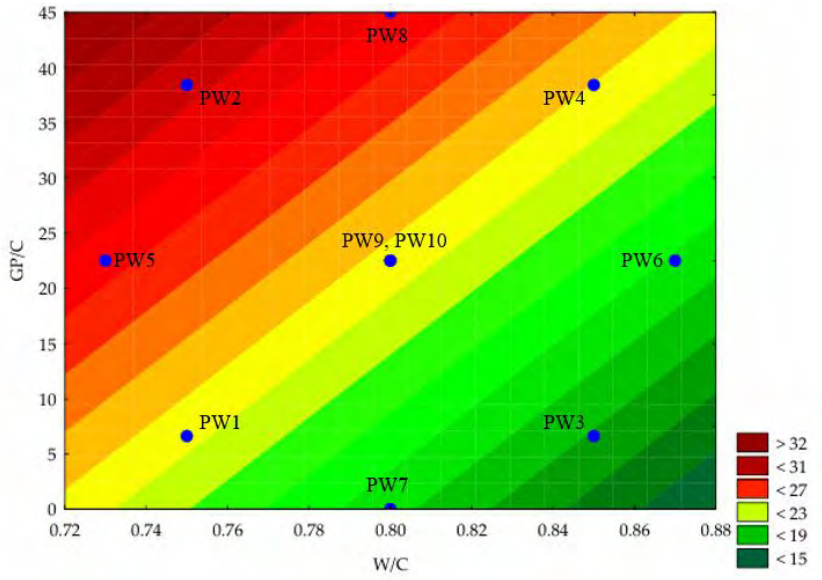
Rys. 4. Mielone szkło z recyklingu opakowań szklanych.
Fotografia własna.

Konsystencja i zawartość powietrza. Konsystencję i zawartość powietrza mierzono po 15 minutach od momentu dodania wody do cementu. Dwie z testowanych mieszanek, mianowicie PW4 (W/C=0,85; GP/C=38,4%) i PW6 (0,87; 22,5%), osiągnęły konsystencję S2 (50 – 90 mm), a pozostałe znalazły się w klasie konsystencji S1 (10 – 40 mm). Całkowita zawartość powietrza w mieszankach wahała się od 4,0 do 5,1%.

Gęstość. Gęstość mieszanki betonowej zawierała się w przedziale od 2219 kg/m^3 do 2273 kg/m^3. Dodanie różnej zawartości proszku szklanego przy równym stosunku woda/cement wpływa na zawartość powietrza w mieszance betonowej i jej konsystencję.

Nasiąkliwość. Analiza wyników nasiąkliwości wykazała, że dodatek szkła mielonego nie pogarsza tego parametru. Dwa betony (PW2 (0,75; 38,4%) i PW5 (0,73; 22,5%) spełniły wymagania nasiąkliwości dla podbudów drogowych (nasiąkliwość poniżej 7,0%) wg normy PN-S-96014:1997 [23]. Pozostałe betony wykazywały nasiąkliwość większą niż 7,0%, ale różnice względem próbki referencyjnej były nie większe niż 1%. Wyjątek stanowił beton oznaczony jako PW6 (0,87; 22,5%), który charakteryzował się najwyższą nasiąkliwością.

Wytrzymałość na ściskanie. Wyniki jednoznacznie wykazały korzystny wpływ dodatku mielonego szkła na wytrzymałość na ściskanie betonu. W stosunku do mieszanki kontrolnej beton z 22,5% GP/C osiągnął wzrost wytrzymałości o ok. 20%. Największy przyrost wytrzymałości stwierdzono dla betonów o niskim W/C i wysokim GP/C PW2 (0,75; 38,4%), PW5 (0,73; 22,5%) i PW8 (0,80; 45%). Ponadto dla betonów PW2 i PW5 uzyskano klasę wytrzymałości C12/15 już po 7 dniach dojrzewania. Wyniki wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania były bardzo zróżnicowane i mieściły się w zakresie od 18,1 do 29,9 MPa. Najwyższą wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania (w zakresie 26,8–29,9 MPa) uzyskały mieszanki o najniższych wartościach wskaźnika W/C=0,73 - 0,80 i różnych proporcjach dodanego szkła odpadowego (mieszanki oznaczono jako PW2 (0,75; 38,4%), PW5 (0,73; 22,5%) i PW8 (0,80; 45%). Wytrzymałość na ściskanie serii PW2 (0,75; 38,4%) i PW8 (0,80; 45%) była wyższa od wytrzymałości na ściskanie mieszanki odniesienia bez szkła o 7,0 – 10,1 MPa (35,4 – 51,0%). Na Rys. 5 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie w zależności od odpowiedniego stosunku wodnocementowego oraz zawartości dodatku w postaci mielonego szkła z recyklingu.



Rys. 5. Zależność wytrzymałości na ściskanie od ilości mielonego szkła i stosunku W/C.
Badania opublikowane w artykule **[P5]**.

Mrozoodporność. Badania mrozoodporności betonu wykonano po 25 i 100 cyklach zamrażania i rozmrażania. Po 25 cyklach wszystkie badane betony spełniły wymagania normy (ubytek masy poniżej 5%, spadek wytrzymałości < 20%). Pomimo oznaczenia stopnia F25 i uzyskania wszystkich wyników na poziomie spełniającym kryterium normy, wykonano równocześnie dodatkowe badanie mrozoodporności betonu po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania. Po 100 cyklach jedynie betony PW2 (0,75; 38,4%) i PW5 (0,73; 22,5%) zachowały pełną odporność: brak spękań i odprysków oraz spadek wytrzymałości poniżej 20%. Beton kontrolny PW7 (0,80; 0,0%) nie spełniał wymagań w zakresie stopnia mrozoodporności F100. Inną możliwą oceną odporności betonu na działanie mrozu jest metoda przedstawiona w normie PN-EN 480. Jest to pośrednia metoda określania mrozoodporności na podstawie ilościowego opisu charakterystyki porów. Przyjmowanym parametrem do oceny odporności betonów na zamrażanie i rozmrażanie jest współczynnik odstępu między porami powietrznymi oznaczony jako L (średnia odległość do najbliższej pustki powietrznej), który nie powinien być większy niż 0,2 mm. Drugim parametrem jest minimalna zawartość powietrza w postaci porów powietrznych mniejszych niż 300 µm, oznaczony jako A300, która powinna wynosić co najmniej 1,5%.

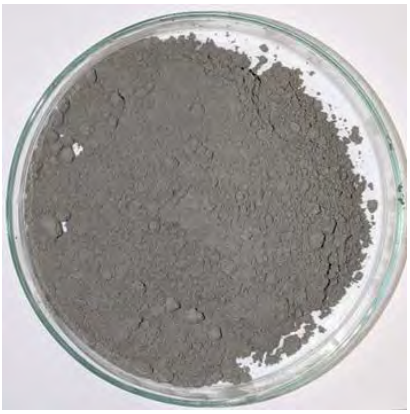
Analiza mikrostruktury porów. Analiza mikrostruktury porów wykazała: dla betonów z dodatkiem szkła PW5 (0,73; 22,5%), PW8 (0,80; 45%), PW9 (0,80; 22,5%) wskaźnik rozmieszczenia porów $L \leq 0{,}11$ mm, zawartość mikroporów A300 w przedziale 2,3-4,3% oraz spełnienie wymagań dla betonów eksploatowanych w środowisku XF. Współczynnik odstępu między pustkami powietrznymi w betonie wynosił od 0,07 do 0,11 mm, podczas gdy powierzchnia właściwa porów powietrznych wynosiła od 18,7 do 22,1 mm^{-1}. Zróżnicowane wyniki uzyskano dla całkowitej zawartości powietrza, w przeciwieństwie do wyników analizy zawartości powietrza w mieszance betonowej, określonej metodą ciśnieniową (od 4,0% do 5,8%). Całkowita zawartość powietrza w stwardniałym betonie mieści się w przedziale 10,9-18,2%. Najwyższą wartość współczynnika odstępu między pustkami powietrznymi (L) i najniższą zawartością powietrza (A300) wykazały betony oznaczone jako PW8 (0,80/45%), w których zastosowano największą ilość dodatku mączki szklanej.

Podsumowanie: Najistotniejszym czynnikiem wpływającym na właściwości betonu okazał się współczynnik W/C oraz zawartość mielonego szkła (GP/C). Obniżenie W/C przy jednoczesnym zwiększeniu udziału szkła prowadzi do wzrostu wytrzymałości na ściskanie oraz poprawy mrozoodporności. Dodatek szkła wpływa również na zmianę konsystencji i zawartości powietrza w mieszance, co pośrednio kształtuje strukturę porów w stwardniałym betonie. Ukształtowana mikrostruktura porów (niższy wskaźnik L i odpowiednia zawartość A300) przekłada się na zwiększoną

odporność na cykle zamrażania i rozmrażania. Zależności te wskazują, że optymalizacja udziału GP/C i W/C pozwala jednocześnie poprawić właściwości mechaniczne oraz trwałość betonu bez pogorszenia nasiąkliwości.

4.2 Badania możliwości zastąpienia popiołów lotnych mielonym szkłem z recyklingu [P4]

W artykule **[P4]** przedstawiono wyniki badań właściwości mieszanek betonowych oraz betonu stwardniałego z różnymi dodatkami: krzemionkowy popiół lotny (FA) - Rys. 6, oraz mielone szkło (GP) - Rys. 7. Ilości popiołu lotnego i mielonego szkła dodanego do mieszanki wynosiły 22,5% i 45% masy cementu (ilość cementu była stała). Sporządzono cztery mieszanki. Stosunek wody do cementu (W/C) był stały i wynosił 0,8 we wszystkich mieszankach betonowych. Mieszanki betonowe przygotowano przy użyciu cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, piasku frakcji 0/2 mm, żwirów o uziarnieniu 2/8 mm i 8/16 mm oraz popiołu lotnego zastępowanego mielonym szkłem.



Rys. 6. Popiół lotny krzemionkowy. *Fotografie własne.*



Rys. 7. Mielone szkło z recyklingu opakowań szklanych.

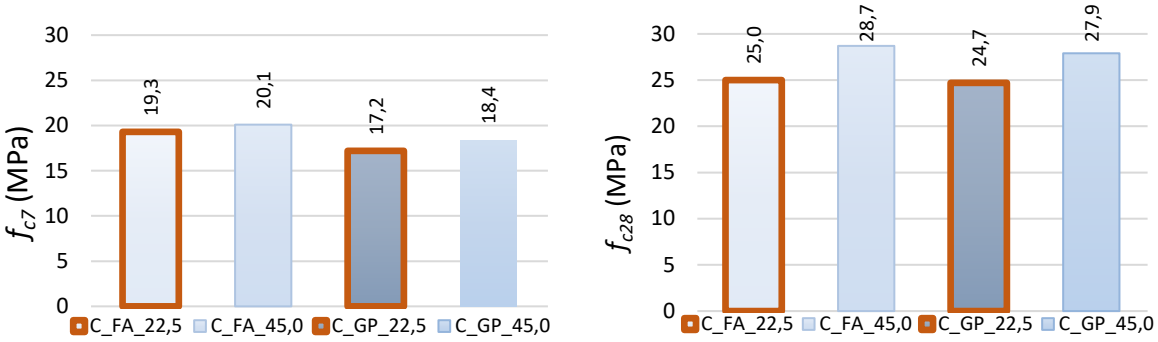
Konsystencja. Konsystencja mieszanki niezależnie od rodzaju dodatku oraz jego procentowej zawartości była klasy S1. Większą płynność mieszanki betonowej uzyskano w przypadku dodatku w postaci mielonego szkła z recyklingu odpadów (opad stożka 30 mm). Natomiast opad stożka dla mieszanek z dodatkiem popiołu lotnego wynosił 10 mm niezależnie od ilości dodatku.

Zawartość powietrza. Zawartość powietrza w mieszance betonowej wynosiła 3,9% dla betonu z 22,5% popiołu lotnego, 4,1% dla betonu z 45% popiołu lotnego oraz 4,8% dla betonu z 22,5% mielonego szkła i 5,1% dla betonu z 45% mielonego szkła.

Gęstość. Gęstość mieszanki betonowej zawierała się w przedziale od 2250 kg/m^3 do 2280 kg/m^3. Gęstość wynosiła 2280 kg/m^3 dla betonu z 22,5% popiołu lotnego, 2270 kg/m^3 dla betonu z 45% popiołu lotnego oraz 2250 kg/m^3 dla betonu z 22,5% mielonego szkła i 2270 kg/m^3 dla betonu z 45% mielonego szkła.

Nasiąkliwość. Dla wszystkich serii przeprowadzono badanie nasiąkliwości betonu. Dla betonu z 22,5 kg/m^3 mielonego szkła odnotowano najwyższą nasiąkliwość wagową betonu. Różnica wynosiła 9,8% w odniesieniu do próbki z taką samą zawartością popiołu lotnego. W przypadku betonu z 45,0 kg/m^3 mielonego szkła różnica ta wynosiła 18,5 % w odniesieniu do betonu z 45,0 kg/m^3 popiołu lotnego. Można wyciągnąć wnioski, iż betony zawierające popiół lotny, są szczelniejsze niż odpowiadające im betony zawierające mączkę szklaną pochodzącą z recyklingu szkła.

Wytrzymałość na ściskanie. Wytrzymałość na ściskanie oznaczano na trzech próbkach, po 7 i 28 dniach dojrzewania wyniki przedstawiono na Rys. 8.



Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie próbek betonu po 7 i 28 dniach dojrzewania.
Badania opublikowane w artykule **[P4].**

Obie serie zawierające 22,5 i 45,0 kg/m^3 szkła wykazały niższą wytrzymałość na ściskanie względem próbek z popiołem lotnym. Obniżenie wytrzymałości wynosiło odpowiednio 11 i 8%. Po dłuższym czasie dojrzewania (28 dni) analizowane betony charakteryzowały się porównywalną wytrzymałością na ściskanie. Maksymalną różnicę wytrzymałości wynoszącą 3% odnotowano dla serii z 45,0 kg/m^3 mielonego szkła względem serii z taką samą zawartością popiołu lotnego. Warto zwrócić uwagę na fakt, iż w początkowej fazie dojrzewania beton z dodatkiem mielonego szkła z recyklingu, wykazywał niższe wytrzymałości w porównaniu do betonu zawierającego popiół lotny. Pozwala to na wyciągnięcie wniosku, iż mielone szkło może powodować wydłużenie przyrostu wytrzymałości wczesnej. Cechy te mogą wpływać na ograniczenie skurczu betonu wynikającego z szybkiego przyrostu wytrzymałości i parowania wody w wyniku procesu hydratacji cementu.

Mrozoodporność. Wyniki oznaczenia mrozoodporności betonów wykonano dla stopnia mrozoodporności F25 i F100. Analiza wyników testu mrozoodporności wykazała dużą różnicę między zachowaniem się betonu z popiołem lotnym i z mączką szklaną poddanych działaniu niskiej temperatury. Na podstawie analizy wyników, można stwierdzić, że tylko mieszanki z dodatkiem mączki szklanej spełniały wymagania klasy F25 i F100 zgodnie z normą PN-B-06250 [24]. Spadek wytrzymałości na ściskanie betonu (ΔR) z dodatkiem mączki szklanej dla stopnia F25 wyniósł 1% dla dodatku 22,5 kg/m^3 oraz 6,8% dla dodatku 45 kg/m^3. Dla stopnia F100 spadek wytrzymałości na ściskanie wyniósł 11,4% i 5,0% (odpowiednio dla dodatków 22,5 kg/m^3 oraz 45 kg/m^3). Uzyskane spadki wytrzymałości były poniżej wymaganych 20%. Zmiana masy nie przekroczyła 0,1% (utrata masy po 25 cyklach zamrażania i rozmrażania) i 0,2% (wzrost masy po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania), co było wartością mniejszą od dopuszczalnego kryterium $\Delta G \leq 5\%$. Największy spadek wytrzymałości na ściskanie po badaniu mrozoodporności betonu dla stopnia F25, zaobserwowano dla mieszanki zawierającej 22,5 kg/m^3 popiołu lotnego (spadek o 28%). Dla stopnia mrozoodporności F100 beton z 45 kg/m^3 popiołu lotnego charakteryzował się spadkiem wytrzymałości na ściskanie (o około 43%), a beton z 22,5 kg/m^3 popiołu lotnego wykazał największy spadek wytrzymałości na ściskanie spośród wszystkich badanych serii (o 58,5%). Ubytek masy był mniejszy od wartości dopuszczalnej (5%) i wyniósł -0,6% (przyrost masy po 25 cyklach zamrażania-rozmrażania) i -1,5% (przyrost masy po 100 cyklach zamrażania/rozmrażania). Dlatego też badane serie betonów z dodatkiem popiołu lotnego należy uznać za nieodporne na działanie mrozu. Wpływ mielonego szkła na trwałość betonu po kilku cyklach zamrażania i rozmrażania był wyraźnie zauważalny poprzez poprawę wytrzymałości na ściskanie betonu po badaniu mrozoodporności.

Podsumowanie: Najważniejszym czynnikiem różnicującym właściwości betonu był rodzaj dodatku mineralnego (popiół lotny FA lub mielone szkło GP), przy stałym współczynniku W/C. Zastosowanie mielonego szkła zwiększało płynność mieszanki oraz zawartość powietrza w porównaniu do popiołu lotnego. Jednocześnie betony z dodatkiem popiołu lotnego charakteryzowały się mniejszą nasiąkliwością, co wskazuje na ich większą szczelność w porównaniu do betonów ze szkłem. Dodatek mielonego szkła powodował obniżenie wytrzymałości na ściskanie we wczesnym okresie dojrzewania, co świadczy o spowolnieniu przyrostu wytrzymałości. Po 28 dniach dojrzewania różnice w wytrzymałości między betonami z popiołem lotnym i szkłem ulegały wyrównaniu. Spowolniony przyrost wytrzymałości w betonach ze szkłem może ograniczać skurcz związany z szybkim przebiegiem hydratacji cementu. Kluczową zależnością jest wyraźna poprawa mrozoodporności betonów zawierających mielone szkło w porównaniu do betonów z popiołem lotnym. Betony z dodatkiem popiołu lotnego wykazywały znaczny spadek wytrzymałości po cyklach zamrażania i rozmrażania, co wskazuje na niższą trwałość w warunkach mrozowych.

4.3 Badania właściwości cementów z dodatkiem mielonego żużla pomiedziowego

Zbadano cementy z dodatkiem mielonego żużla pomiedziowego z Huty Głogów II (Rys. 9). Procentowa zawartość dodatku w stosunku do masy cementu była następująca: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 i 60%. Do wykonania zaprawy wzorcowej użyto cementu CEM I 42,5R. Celem było oznaczenie wpływu tego dodatku na normowe właściwości mechaniczne cementu. Surowcem wyjściowym był oczyszczony z zanieczyszczeń organicznych oraz wysuszony żużel pomiedziowy frakcji 0 - 32,5 mm. Powierzchnia właściwa zmielonego żużla pomiedziowego została oznaczona metodą Blaine'a i wynosiła 3248 cm^2/g. Dla porównania oznaczono powierzchnię właściwą cementu CEM I 42,5 R, która według deklaracji producenta była równa 3742 cm^2/g, a w badaniu uzyskano powierzchnię właściwą na poziomie 3526 cm^2/g.

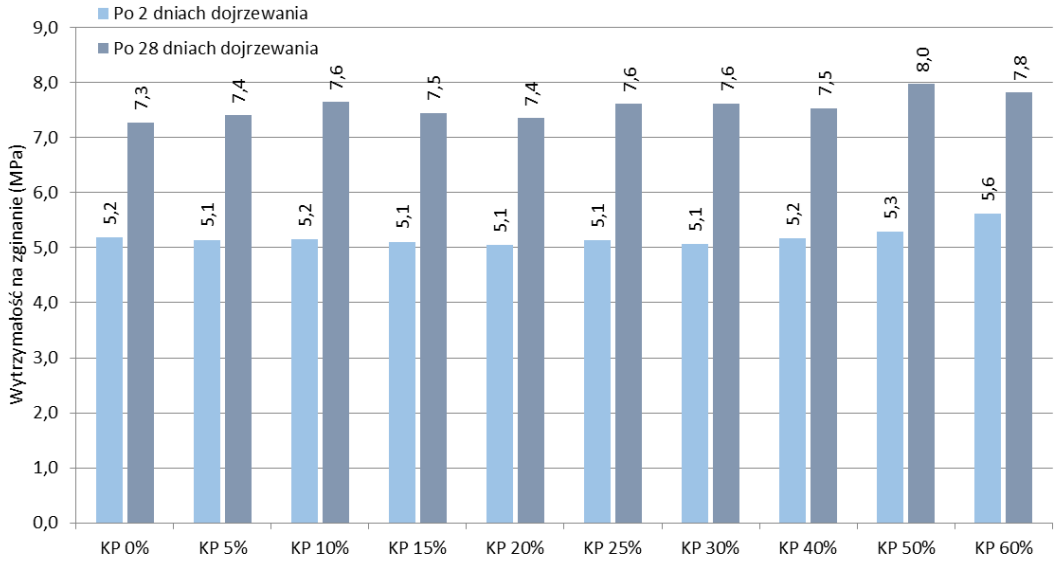


Rys. 9. Mielony żużel pomiedziowy.
Fotografia własna.

Konsystencja. Konsystencja zapraw zależała od ilości dodatku żużla pomiedziowego; średnica rozpływy zmieniała się od 154 mm do 110 mm odpowiedni dla zwiększającej się ilości dodatku żużla od 5% do 60%. Średnica rozpływu zaprawy wzorcowej to 158 mm.

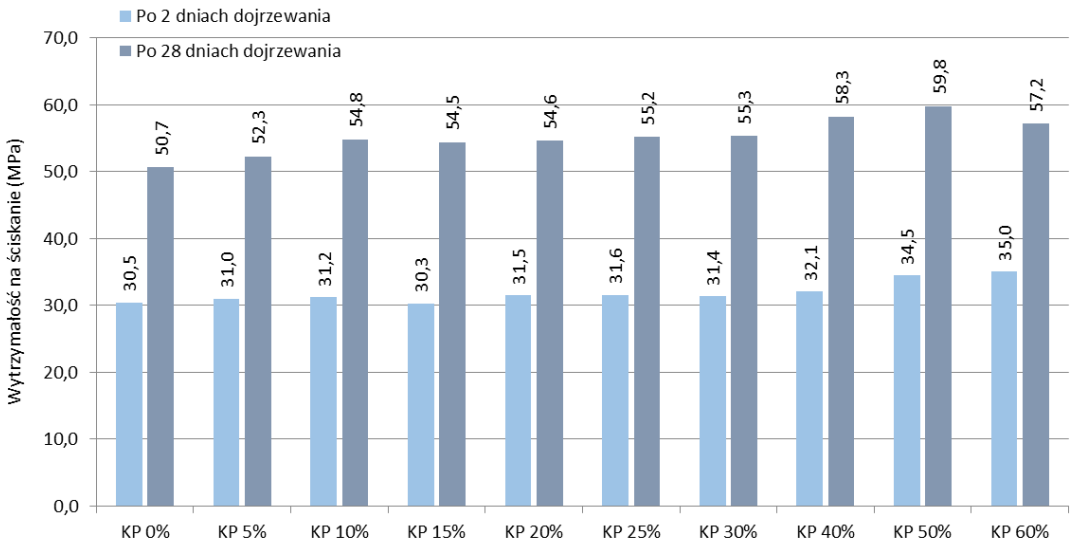
Gęstość. Gęstość zaprawy rosła wraz ze wzrostem dodatku żużla pomiedziowego od około 2260 kg/m^3 do około 2320 kg/m^3. Pomimo spodziewanego wzrostu gęstości zapraw modyfikowanych mielonym kruszywem pomiedziowym nie odnotowano wysokich przyrostów gęstości z duża ilością dodatku. Ostateczny wzrost gęstości względem zaprawy wzorcowej wynosił około 2,8% w przypadku wytrzymałości 2 dniowej i 2,6% w przypadku wytrzymałości 28 dniowej.

Wytrzymałość na zginanie. Cementy z różną zawartością dodatku mielonego kruszyw z żużla pomiedziowego poddano oznaczeniu wytrzymałości na zginanie. Na Rys. 10 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na zginanie. Pomimo pogarszającej się urabialności zapraw wraz ze wzrostem ilości dodatku, nie odnotowano znaczących spadków wytrzymałości na zginanie zapraw modyfikowanych mielonym żużlem pomiedziowym. Zaprawy po 2 dniach dojrzewania posiadające w swoim składzie od 5 do 30% dodatku wykazały nieznaczne spadki wytrzymałości na zginanie względem próbki wzorcowej (na poziomie 1-3%). Dla zapraw posiadających powyżej 40% dodatku, nastąpił przyrost wytrzymałości na zginanie. Maksymalny przyrost wytrzymałości na zginanie po 2 dniach dojrzewania względem próbki referencyjnej wyniósł 8% w przypadku zaprawy z dodatkiem 60% mączki. W przypadku wytrzymałości na zginanie po 28 dniach dojrzewania wszystkie próbki wykazały przyrost wytrzymałości względem próbki referencyjnej. Zaprawy posiadające w swoim składzie od 5 do 40% dodatku wykazały nieznaczne przyrosty wytrzymałości na zginanie względem próbki referencyjnej (na poziomie 1-5%). Najwyższy przyrost wytrzymałości wynoszący 10% odnotowano w przypadku próbki zawierającej aż 50% dodatku mielonego kruszywa pomiedziowego.



Rys. 10. Wytrzymałość na zginanie zapraw cementowych z mielonym żużlem pomiedziowym. *Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.*

Wytrzymałość na ściskanie. Cementy z różną zawartością dodatku mielonego żużla pomiedziowego poddano oznaczeniu wytrzymałości na ściskanie. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie zapraw po 2 i 28 dniach dojrzewania zaprezentowano na Rys. 11. Wśród badanych próbek, seria z 60% dodatku po 2 dniach dojrzewania wykazała wysoki, aż 15%, przyrost wytrzymałości na ściskanie względem próbki referencyjnej. Przyrost ten należy uznać za znaczny. Również wysoki przyrost odnotowano w przypadku serii z 50% dodatku, a stanowił on wartość o 13% wyższą niż wytrzymałość serii wzorcowej. W przypadku wytrzymałości na ściskanie zapraw po 28 dniach dojrzewania, największy przyrost wytrzymałości na ściskanie odnotowano w przypadku serii z 50% dodatku wynoszący 18%. Porównywalne wartości uzyskano dla serii z 60% dodatku, a przyrost wytrzymałości na ściskanie wyniósł w tym przypadku 13%.



Rys. 11. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych z mielonym żużlem pomiedziowym. *Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.*

Nasiąkliwość. Badanie nasiąkliwości zapraw wykonano na próbkach po badaniu wytrzymałości na ściskanie zapraw po 28 dniach dojrzewania. Analizując uzyskane wyniki, należy stwierdzić pozytywny wpływ zastosowania mielonego kruszywa pomiedziowego na nasiąkliwość zapraw cementowych. Wszystkie modyfikowane zaprawy wykazały niższą nasiąkliwość wagową niż próbka referencyjna. Najniższą nasiąkliwość odnotowano w przypadku dodatku na poziomie 50%, spadek nasiąkliwości wynosił aż 12% względem próbki referencyjnej. Porównywalne rezultaty odnotowano dla wszystkich badanych zapraw.

Podsumowanie: Wraz ze wzrostem zawartości dodatku następowało pogorszenie urabialności zapraw, co przejawiało się zmniejszeniem średnicy rozpływu. Jednocześnie wzrost udziału żużla powodował nieznaczne zwiększenie gęstości zapraw. Dodatek żużla pomiedziowego nie powodował istotnego obniżenia wytrzymałości na zginanie, a przy wyższych jego zawartościach prowadził do jej wzrostu. W przypadku wytrzymałości na ściskanie zaobserwowano wyraźny wzrost wraz ze zwiększeniem udziału dodatku, szczególnie dla zawartości 50–60%. Największe przyrosty wytrzymałości na ściskanie odnotowano zarówno po 2, jak i 28 dniach dojrzewania dla najwyższych udziałów dodatku. Zastosowanie mielonego żużla pomiedziowego prowadziło również do obniżenia nasiąkliwości zapraw cementowych. Najkorzystniejsze efekty w zakresie szczelności i wytrzymałości uzyskano dla dodatku na poziomie około 50%, co wskazuje na optymalny zakres jego stosowania.

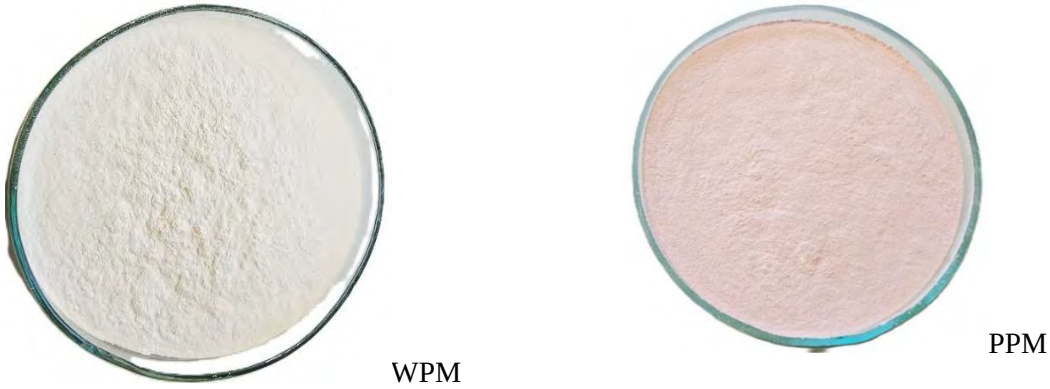
Badania przedstawione w niniejszym rozdziale nie były przedmiotem wcześniejszych publikacji naukowych i stanowią uzupełniający, autorski element rozprawy doktorskiej. Nie zostały one włączone do cyklu publikacji. Zamieszczenie wyników ma na celu rozszerzenie zakresu merytorycznego pracy oraz zapewnienie spójności i kompletności prowadzonych analiz badawczych.

5 Zastosowanie odpadów do modyfikacji składu ziarnowego zapraw i betonów

Celem przeprowadzonych badań była analiza możliwości zastosowania w zaprawach i betonach kruszyw pochodzących z recyklingu oraz ocena ich wpływu na zachowanie projektowanych właściwości kompozytów cementowych. Kluczowym aspektem w ocenie przydatności do stosowania danej grupy odpadów w zaprawach i betonach jest rozpoznanie ich właściwości mechanicznych, fizycznych i chemicznych po dokonaniu modyfikacji składu kompozytu cementowego.

5.1 Badania właściwości zapraw z dodatkiem rozdrobnionych włókien szklanych [P6]

W artykule **[P6]** przedstawiono wyniki badań zapraw cementowych modyfikowanych różną ilością dwóch rodzajów proszków pozyskanych z instalacji odpylania podczas recyklingu mechanicznego łopat turbin wiatrowych. Łopaty turbin wiatrowych wykonane są głównie z kompozytów z włókna szklanego i włókien węglowych. Odzyskane pyły zaprezentowano na Rys. 12. Celem przeprowadzonych badań było określenie możliwości zastosowania tego rodzaju dodatku do spoiwa cementowego pod kątem zachowania deklarowanej klasy wytrzymałości cementu. Badania zapraw cementowych obejmowały oznaczenie: wytrzymałości na ściskanie i zginanie po 2 i 28 dniach dojrzewania; gęstości pozornej i nasiąkliwości po 28 dniach dojrzewania oraz określenie konsystencji świeżej mieszanki. Skład zapraw cementowych był następujący: cement – 450 g; woda – 225 ml; piasek normowy – 1350 g, a procentowa ilość proszków WPM i PPM w stosunku do stałej masy cementu wynosiła 5, 10, 15, 20, 30 i 40%, co stanowi wagowo odpowiednio 22,5; 45; 67,5; 90; 135 i 180 g. Wskaźnik wodno-cementowy zapraw w/c = 0,5.



WPM PPM

Rys. 12. Pyły pozyskane z instalacji odpylania podczas recyklingu mechanicznego łopat turbin wiatrowych.

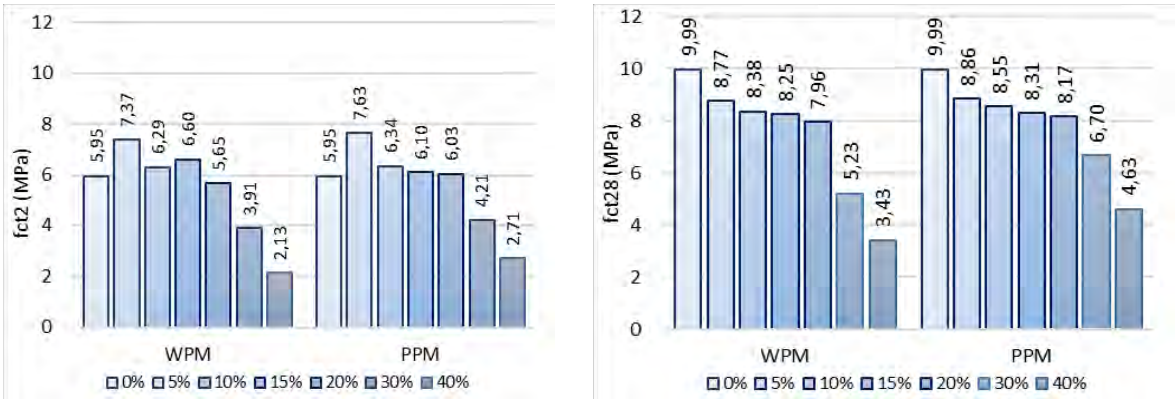
Fotografia własna.

Konsystencja. Średnica rozpływu mieszanek zaprawy referencyjnej, bez dodatku proszków, wynosiła 155 mm. W przypadku dodania 15% i więcej proszku białego oraz 20% i więcej proszku różowego, średnica rozpływu była taka sama (100 mm). Uzyskane wyniki badań świadczą o dużej wodożądności zastosowanych proszków, co pogarszało w istotny sposób konsystencję oraz urabialność zapraw cementowych.

Gęstość. Zgodnie z oczekiwaniami zwiększanie dodatku proszków WPM i PPM spowodowało zmniejszenie gęstości. Próbka referencyjna wykazywała gęstość równą 2284 kg/m^3. W przypadku proszku PPM gęstość zaprawy obniżyła się maksymalnie o 5% dla dodatku o masie do 20%. W skrajnym przypadku stwierdzono zmniejszenie gęstości pozornej o 16% (dodatek w ilości 40% masy). W przypadku dodatku proszku WPM maksymalny spadek wynosił 11% (dodatek w ilości 40% masy), a w pozostałych mieszankach zaobserwowano liniowy spadek gęstości o maksymalnie 6% względem próbki referencyjnej.

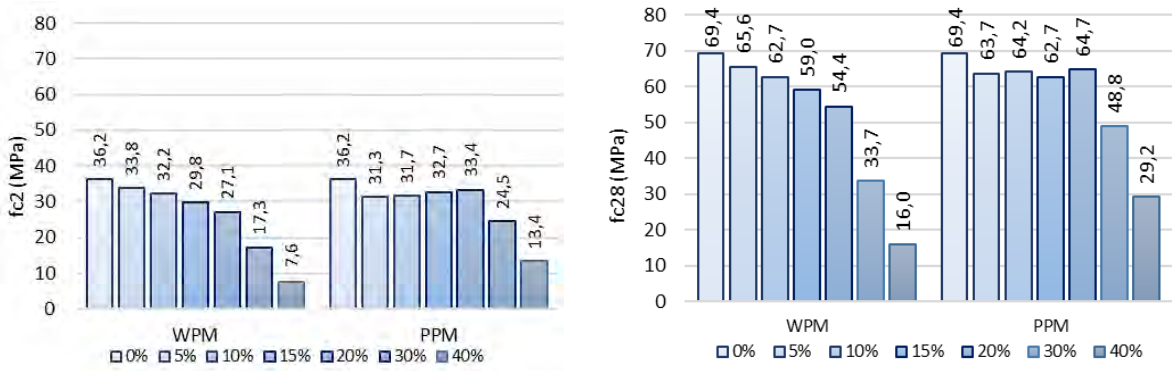
Nasiąkliwość. Z kolei największa ilość dodanego PPM (40%) spowodowała zwiększenie nasiąkliwości zaprawy o prawie 50% w porównaniu z próbką referencyjną. Wynika to ze zwiększenia porowatości zapraw, będącej efektem pogarszającej się urabialności wraz ze wzrostem ilości dodawanych proszków. Mieszanki zawierające do 20% dodatku wykazywały podobną nasiąkliwość (8,5 – 9,1%), mieszanka z 30% dodatku miała nasiąkliwość równą 9,8%. Podobne wynik uzyskano dla mieszanek z dodatkiem PPM. Mieszanka z 30% dodatku miała nasiąkliwość równą 9,3% a mieszanka z 40% dodatku 11,0%.

Wytrzymałości na zginanie. Na Rys. 13 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na zginanie. Efektem dodania 5% proszku WPM i PPM jest wzrost dwudniowej wytrzymałości na zginanie do 124% w przypadku proszku WPM i do 128% w przypadku proszku PPM, natomiast efektem dodatku proszków w ilości 30 i 40% jest spadek wytrzymałości na zaginanie do 36 i 46% wytrzymałości referencyjnej odpowiednio w przypadku WPM i PPM. W pozostałych przypadkach zaobserwowano przyrost wytrzymałości po dodaniu proszku WPM i PPM. Po 28 dniach dojrzewania mamy do czynienia ze zmniejszeniem wytrzymałości na zginanie wraz ze wzrostem ilości dodanych proszków WPM i PPM. Charakter zmian wytrzymałości w przypadku obu proszków jest bardzo podobny. Dodatek proszków nieprzekraczający 20% powoduje, że wytrzymałość na zginanie stanowi nie mniej niż 80% wytrzymałości referencyjnej, a po przekroczeniu tej ilości wytrzymałość na zginanie zmniejsza się do 34% w przypadku WPM i do 46% w przypadku PPM. Pozytywny wpływ dodatku proszków WPM i PPM na wytrzymałość dwudniową na zginanie jest zaskakujący, biorąc pod uwagę zmniejszenie wytrzymałości wczesnej na ściskanie. Stwierdzony wzrost wytrzymałości na zginanie może wskazywać na obecność bardzo drobnych frakcji włóknistych w proszkach białym i różowym, które mogły zadziałać jak mikrozbrojenie rozproszone.



Rys. 13. Wpływ dodatku proszków WPM i PPM na 2 i 28 dniową wytrzymałość na zginanie zapraw. *Opracowanie własne. Opublikowane w* **[P6]**.

Wytrzymałość na ściskanie. Na Rys. 14 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie. Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach dojrzewania według wymagania normy powinna wynosić ≥20,0 MPa, a w przypadku wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania powinna zawierać się w przedziale ≥42,5 ≤ 62,5 MPa. Dodatek proszku WPM w ilości 5–20% powoduje liniowy spadek wytrzymałości na ściskanie po 2 i 28 dniach dojrzewania o maksymalnie 25%. Dodatek proszku PPM w ilości 5–20% nie powoduje dużych spadków wytrzymałości wczesnej i normowej niezależnie od ilości dodawanego proszku, a wytrzymałość zmienia się o maksymalnie 5 MPa w odniesieniu do wytrzymałości próbek referencyjnych (fc_2). Dodatek proszków WPM i PPM w ilości 30% i 40% skutkuje zmniejszeniem wytrzymałości dwudniowej odpowiednio do 21 i 36%, a wytrzymałości 28-dniowej odpowiednio do 23 i 42%. Stwierdzono, że zaprawy z dodatkiem PPM mają większą wytrzymałość na ściskanie niż z dodatkiem proszku WPM. W przypadku dodatku 20% proszków WPM i PPM wytrzymałość na ściskanie jest mniejsza o maksymalnie 20%.



Rys. 14. Wpływ dodatku proszków WPM i PPM na 2 i 28 dniową wytrzymałość na ściskanie zapraw. *Opracowanie własne. Opublikowane w* **[P6]**.

Wskaźnik kruchości. Wskaźnik kruchości betonów wynosi ok. 1/8 = 0,125, a badanych zapraw zmienia się z ilością proszków WPM oraz PPM. Najwyższy wskaźnik kruchości odnotowano dla proszków WPM (0,182) przy zawartości 40%, w przypadku zaprawy z proszkiem PPM o tej samej zawartości wartość ta była równa 0,159. Najniższy wskaźnik kruchości odnotowano dla proszku PPM przy zawartości na poziomie 20%, a wynosił on 0,126. W przypadku zapraw z proszkiem białym WPM różnica między wytrzymałością na rozciąganie i wytrzymałością na ściskanie jest mniejsza niż w przypadku zapraw z proszkiem różowym PPM.

Podsumowanie: Dodatkami do betonów pochodzącymi z recyklingu kompozytów szklanych można modyfikować właściwości mechaniczne i fizyczne zapraw. Dodanie odpadów GFRP w postaci proszków WPM i PPM w ilości większej niż 20% masy cementu pogarsza właściwości mechaniczne zapraw cementowych – zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie. Zastosowanie tych odpadów w ilości do 20% masy cementu pogarsza wytrzymałość na ściskanie maksymalnie o 20%, ale nie wpływa na wytrzymałość na zginanie w przypadku wytrzymałości wczesnej. W przypadku wytrzymałości na zginanie po 28 dniach zaobserwowano spadki o maksymalnie 20% dla dodatku GFRP do 20%, oraz maksymalny spadek (66%) w przypadku zastosowania 40% dodatku WPM. Dodatkiem proszków WPM i PPM można modyfikować właściwości fizyczne zapraw cementowych i betonu. Dodatek proszków WPM i PPM do zapraw cementowych obniża istotnie ich gęstość pozorną i zwiększa porowatość, a tym samym przyczynia się do zwiększenia nasiąkliwości. Dodatki WPM i PPM mogą być z powodzeniem stosowane w zaprawach cementowych.

5.2 Badania właściwości zapraw z dodatkiem pyłu z gumy SBR [P1]

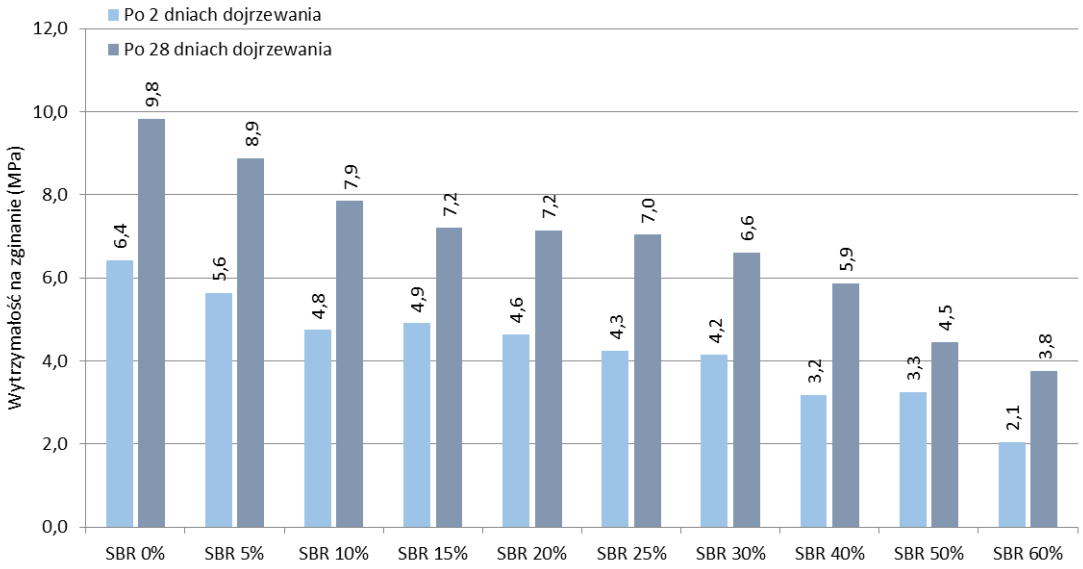
W artykule **[P1]** przedstawiono wyniki badań zapraw z dodatkiem pyłu z gumy SBR. W wyniku recyklingu gumowych materiałów odpadowych otrzymywane są materiały o różnych frakcjach: strzępy, chipsy, grysy, ścier, granulat, miał. Odzyskany materiał z recyklingu wykorzystywany jest w budownictwie jako wypełniacz izolujący termicznie i akustycznie, dodatek do modyfikacji asfaltów oraz materiał do produkcji nawierzchni bezpiecznych na boiskach czy placach zabaw. Prowadzone są także badania nad możliwością wykorzystania granulatu gumowego jako zamiennika zazwyczaj drobnych frakcji kruszywa mineralnego do produkcji zapraw oraz betonów cementowych. Zaplanowano ocenę wpływu drobnych frakcji z odpadów gumowych w postaci miału gumowego SBR (Rys. 15) na następujące parametry: wytrzymałość na zginanie po 2 i 28 dniach dojrzewania, wytrzymałość na ściskanie po 2 i 28 dniach dojrzewania, gęstość po 2 i 28 dniach dojrzewania oraz ich nasiąkliwość. Metodę badawczą zmodyfikowano przez dodanie do zaprawy wzorcowej miału gumowego SBR. Jego procentowa zawartość w stosunku do masy cementu była następująca: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 i 60%.



Rys. 15. Pył z gumy SBR.
Fotografia własna.

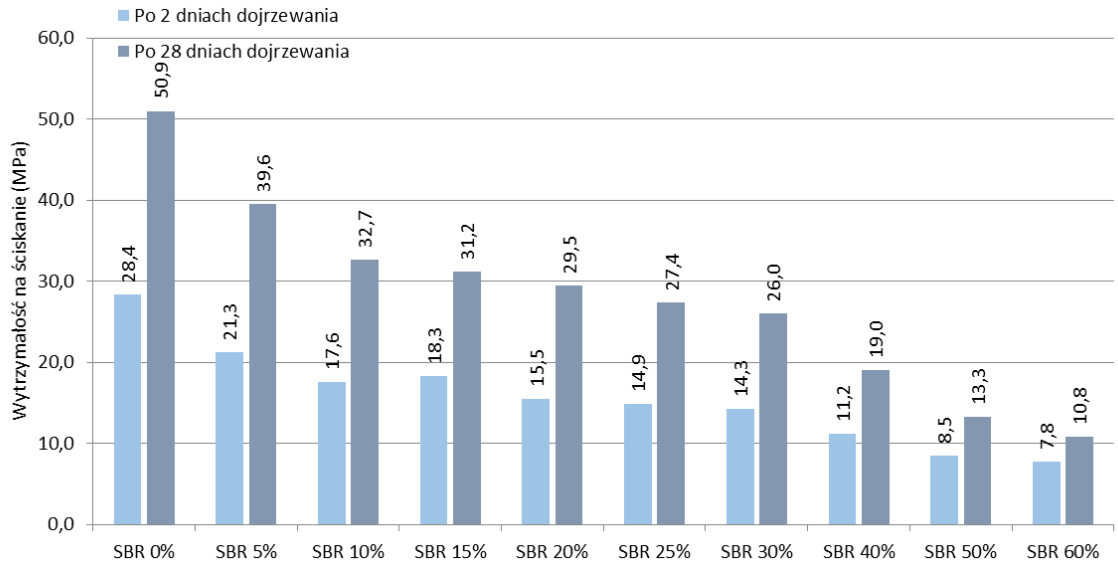
Konsystencja. Wraz ze wzrostem zawartości miału gumowego, konsystencja ulegała pogorszeniu. Wzrost zawartości gumy w zaprawie powodował pochłanianie wody z zaczynu cementowego, co powodowało pogorszenie zdolności do zagęszczania zapraw. Najgorszą urabialność odnotowano dla mieszanki zawierającej dodatek gumy na poziomie 60%. Najlepszą urabialność wykazywały mieszanki niezawierające w składzie miału gumowego. Średnica rozpływu zmieniała się liniowo od 136 mm dla zaprawy bez gumy do 105 mm dla zaprawy z 60% dodatkiem miału.

Wytrzymałości na zginanie. Na Rys. 16 przedstawiono wpływ zawartości miału gumowego na wytrzymałość na zginanie. Zmiana wytrzymałości na zginanie zależy od zawartości gumy. Z uzyskanych wyników widać silną tendencję spadkową wytrzymałości na rozciąganie wraz ze wzrostem zawartości gumy. W przypadku maksymalnej zawartości gumy w zaprawie SBR 60% spadek wytrzymałości na zginanie nie przekraczał 70% w przypadku wytrzymałości 2-dniowej i około 62% w przypadku wytrzymałości 28-dniowej. Spadek wytrzymałości na zginanie nieprzekraczający 20% wytrzymałości względem próbki wzorcowej (SBR 0%) obserwowano w seriach z 0%, 5% i 10% dodatkiem miału gumowego. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu również uległa obniżeniu, jednak spadek ten był o około 10% mniejszy w porównaniu do wytrzymałości na ściskanie i wynosił odpowiednio 30% i 70% dla zawartości gumy na poziomie 20% i 60%.



Rys. 16. Wytrzymałość na zginanie zapraw cementowych.
Badania opublikowane w artykule **[P1]**.

Wytrzymałość na ściskanie. Na Rys. 17 przedstawiono wyniki badań próbek na wytrzymałość na ściskanie. Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach dojrzewania zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości dodatku miału gumowego SBR. Natomiast, dodatek w ilości 5% masy cementu (22,5 g gumy) powoduje zmniejszenie wytrzymałości o 22%. Największy spadek wytrzymałości na ściskanie (73%) zaobserwowano przy dodatku gumy na poziomie 60%. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż spadek wytrzymałości na ściskanie jest znacznie wyższy od spadku wytrzymałości na zginanie badanych kompozytów. Serie SBR 0% oraz SBR 5% spełniły wymagania normowe wytrzymałości na ściskanie zapraw po 2 dniach dojrzewania. W ocenie wytrzymałości na ściskanie zapraw po 28 dniach dojrzewania można stwierdzić, że wymagania normowej wytrzymałości na ściskanie spełniła jedynie seria zapraw nie zawierająca dodatku gumy. Badania przeprowadzone na zaprawach cementowych wykazały wyraźny spadek wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu wraz ze wzrostem zawartości miału gumowego. Spadek wytrzymałości na ściskanie wynosił odpowiednio około 44% i 79% dla zawartości gumy na poziomie 20% i 60%.



Rys. 17. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych modyfikowanych miałem gumowym. *Badania opublikowane w artykule* **[P1]**.

Gęstość. Gęstość oznaczono dla próbek dojrzewających w wodzie przez 2 i 28 dni. Uzyskane wyniki badań wskazują na duży spadek gęstości pozornej wraz ze wzrostem dodatku miału gumowego. Dla zawartości gumy 60% spadek gęstości pozornej wynosi około 15%. Gęstość zapraw zawierała się w przedziale ok. 2260 kg/m^3 do 1940 kg/m^3.

Nasiąkliwość. Nasiąkliwość zapraw została oznaczona w celu oceny wpływu dodatku gumy na właściwości uszczelniające zapraw i betonów cementowych. Zdecydowana większość uzyskanych wyników nasiąkliwości mieści się w granicach około 10%. Próbki serii wzorcowej wykazały nasiąkliwość na poziomie 9,5%. Dodatek miału gumowego nie wpływa istotnie na nasiąkliwość zapraw, o ile jego zawartość nie przekracza 40%. Warto jednak zwrócić uwagę, że przy udziale 25% SBR zaobserwowano wyraźny spadek nasiąkliwości 8,2%. Niepokojącym zjawiskiem jest natomiast istotny wzrost nasiąkliwości powyżej 40% dodatku gumy.

Wskaźnika kruchości. Wraz ze wzrostem udziału miału SBR zaprawa cementowa staje się mniej krucha, co wynika ze zwiększenia stosunku wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie. Wyniki z oznaczenia wskaźnika kruchości zapraw cementowych z różną ilością dodatku miału gumowego zawierały się w przedziale 0,23 – 0,28 dla wytrzymałości wczesnej oraz 0,20 – 0,35 dla wytrzymałości normowej. Najwyższy wskaźnik kruchości odnotowano w przypadku zapraw zawierających 60% dodatku, najniższy dla próbek wzorcowych. Wskaźnik kruchości zapraw po 28 dniach zmieniał się w sposób liniowy dla zapraw zawierających do 30% gumy i osiągnął wartość do

0,25. Wraz ze wzrostem zawartości gumy nastąpił gwałtowny wzrost wskaźnika aż do wartości 0,35. Zmiana wskaźnika kruchości dla próbek po 2 dniach dojrzewania przebiegała parabolicznie z wartości 0,23 do 0,28 wraz ze wzrostem zawartości gumy w składzie zaprawy.

Podsumowanie: Głównym czynnikiem wpływającym na właściwości zapraw cementowych był udział miału gumowego SBR w stosunku do masy cementu. Wraz ze wzrostem zawartości dodatku następowało pogorszenie urabialności zapraw, wynikające z absorpcji wody przez cząstki gumy. Zwiększenie udziału SBR powodowało istotny spadek wytrzymałości na ściskanie oraz na zginanie, przy czym spadek wytrzymałości na ściskanie był wyraźnie większy. Wzrost zawartości gumy prowadził również do obniżenia gęstości zapraw, co wskazuje na możliwość uzyskania materiałów o zmniejszonej masie objętościowej. Dodatek SBR nie wpływał istotnie na nasiąkliwość zapraw do poziomu około 40%, natomiast powyżej tej wartości obserwowano jej wzrost. Jednocześnie przy zawartości około 25% odnotowano obniżenie nasiąkliwości. Wraz ze wzrostem udziału miału gumowego zwiększał się wskaźnik kruchości, co wskazuje na zmianę charakteru pracy materiału. Uzyskane wyniki potwierdzają, że dodatek miału gumowego istotnie modyfikuje właściwości mechaniczne i fizyczne zapraw, szczególnie w zakresie wytrzymałości i gęstości.

5.3 Badania właściwości zapraw z dodatkiem drobnego kruszywa z żużla pomiedziowego

Badania polegały na ocenie możliwości zastosowania kruszywa z żużla pomiedziowego (KP) w zaprawach jako zamiennik kruszywa drobnego (Rys. 18). Zbadano możliwości zastąpienia piasku naturalnego piaskiem z żużla pomiedziowego o frakcji 0-2 mm. Badane kruszywo pomiedziowe posiada dużą zawartość pyłu około 5%. Ocenie podlegały zaprawy normowe, których skład podstawowy zmieniał się poprzez redukcję ilość piasku wzorcowego wagowo o 25, 50, 75 i 100% zastępowanego przez KP.



Rys. 18. Kruszywo z żużla pomiedziowego 0-2 mm.
Fotografia własna.

W Tab. 2 przedstawiono koncepcję składów granulometrycznych mieszanek różniących się udziałem drobnego kruszywa z żużla pomiedziowego.

Tab. 2. Skład zapraw cementowych modyfikowanych drobnym kruszywem pomiedziowym.

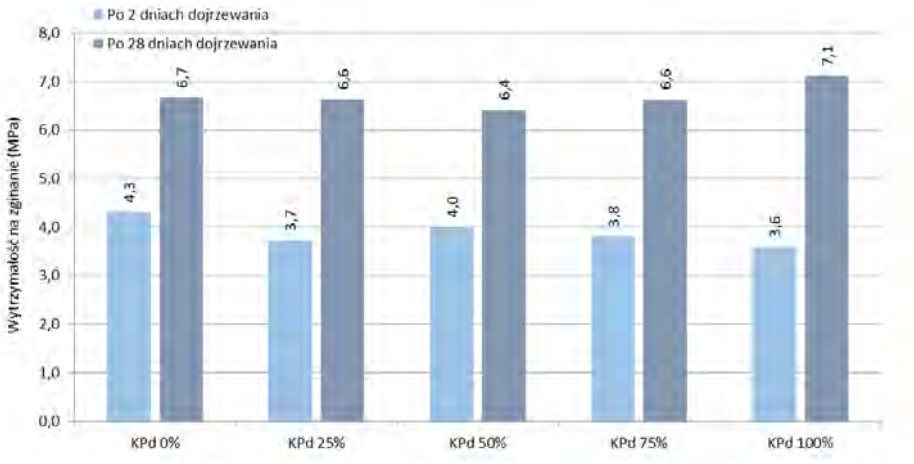
Symbol mieszanki	Skład zaprawy modyfikowanej kruszywem pomiedziowym o frakcji 0-2 mm (g)			
	Woda	CEM I 42,5R	Piasek wzorcowy	Kruszone pomiedziowe
KPd 0%	225	450	1350	0,0
KPd 25%			1012,5	337,5
KPd 50%			675,0	675,0
KPd 75%			337,5	1012,5
KPd 100%			0,0	1350

Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.

Konsystencja. W wyniku przeprowadzonych badań konsystencji nie odnotowano znaczącej zmiany rozpływu zapraw. Pomimo różnicy około 5-10 mm zaobserwowano wpływ zwiększającej się ilości kruszywa pomiedziowego na urabialność zaprawy. Czynnik ten miał decydujący wpływ na zagęszczenie próbek. Zaprawy o zastąpieniu kruszywa naturalnego w 75% i 100% , zaprawy te były trudnozagęszczalne.

Gęstość. Wraz ze wzrostem zawartości kruszywa rośnie gęstość zapraw. Wzrost o 9% względem próbki referencyjnej odnotowano w przypadku zapraw KPd 100% pielęgnowanych przez 2 i 28 dni w wodzie. Przyrost gęstości zapraw zmieniał się liniowo od 2240 do 2460 kg/m^3 wraz ze wzrostem procentowej zawartości dodatku w składzie poszczególnych mieszanek.

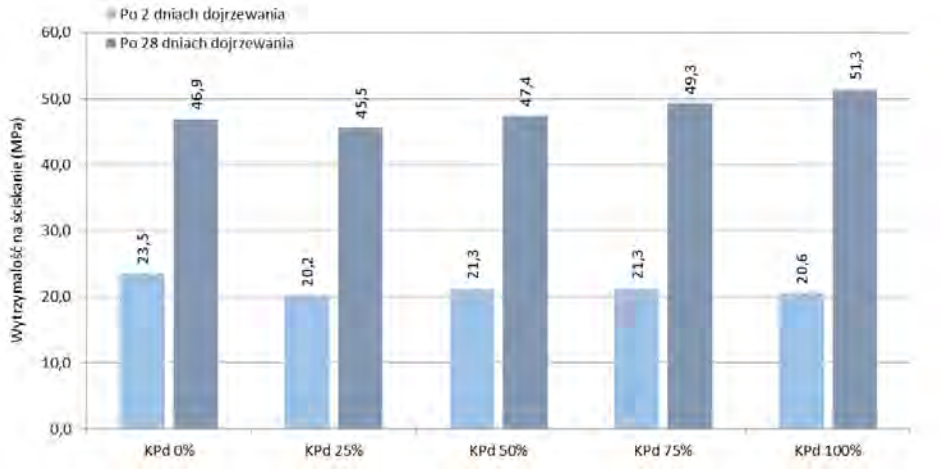
Wytrzymałości na zginanie. Na Rys. 19 przedstawiono wyniki z przeprowadzonego oznaczenia wytrzymałości na zginanie po 2 i 28 dniach dojrzewania zapraw modyfikowanych kruszywem pomiedziowym. Największą wartość wczesnej wytrzymałości na zginanie (4,31MPa) osiągnęła zaprawa wzorcowa (referencyjna). Najwyższa różnica wytrzymałości na zginanie względem próbki referencyjnej po 2 dniach dojrzewania wynosiła 0,72MPa. Najniższym spadkiem wytrzymałości na zginanie z tej grupy była zaprawa zawierająca 50% dodatku w swoim składzie. Spadek wytrzymałości wyniósł 7%. Najwyższy spadek wytrzymałości na zgnanie po 2 dniach dojrzewania wynosił 17% w przypadku zapraw zawierających 100% kruszywa pomiedziowego w swoim składzie. Najwyższy przyrost wytrzymałości normowej na zginanie zanotowano dla próbek zawierających 100% kruszywa pomiedziowego. Wzrost wytrzymałości względem próbki referencyjnej wyniósł 7%. W przypadku zapraw zawierających 25% i 75% kruszywa z żużla pomiedziowego nie odnotowano spadków wytrzymałości względem próbki referencyjnej.



Rys. 19. Wytrzymałość na zginanie zapraw cementowych modyfikowanych kruszywem z żużla pomiedziowego o frakcji 0-2 mm.

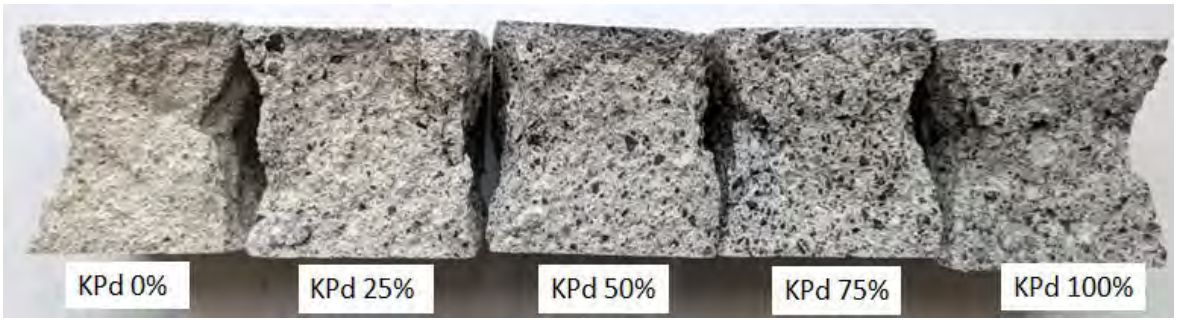
Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.

Wytrzymałości na ściskanie. Uzyskane rezultaty badań wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na Rys. 20. Największy spadek wynoszący 14% odnotowano dla zaprawy z 25% zastąpieniem kruszyw z żużla pomiedziowego. Pozostałe zaprawy wykazywały spadek wytrzymałości na ściskanie względem próbki referencyjnej na poziome około 10%. Maksymalny spadek wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach dojrzewania zapraw wynosił 3,3 MPa względem próbki referencyjnej. Ponadto wszystkie zaprawy osiągnęły wymagania normowe po 28 dniach dojrzewania. Najwyższą wytrzymałość na ściskanie uzyskała seria KPd 100%, a przyrost wytrzymałości wyniósł 9% względem próbki referencyjnej. Przyrost wytrzymałości odnotowano również w przypadku serii KPd 50% i KPd 75%. Przyrost ten wyniósł odpowiednio 1 i 5% względem próbki referencyjnej. Seria KPd 25% wykazała 3% spadek wytrzymałości względem KPd 0%. Na Rys. 21 przedstawiono próbki po badaniu wytrzymałości na ściskanie.



Rys. 20. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych modyfikowanych kruszywem z żużla pomiedziowego frakcji 0-2 mm.

Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.



Rys. 21. Próbki po badaniu wytrzymałości na ściskanie zapraw modyfikowanych drobnym kruszywem z żużla pomiedziowego.

Fotografia własna - niepublikowana.

Nasiąkliwość. Badania nasiąkliwości zapraw cementowych z zastosowanym żużlem pomiedziowym wykazały zbliżone wyniki nasiąkliwości zapraw. W przypadku zapraw, w których zamieniono 75% masy kruszywa wzorcowego kruszywem pomiedziowym, nasiąkliwość była niższa o 10% względem próbki referencyjnej. W przypadku betonu zawierającego 100% kruszywa pomiedziowego w składzie zaprawy nasiąkliwość była niższa o 9% względem próbki referencyjnej KPd 0%. Najwyższa nasiąkliwość została odnotowana dla zaprawy niezawierającej kruszywa pomiedziowego, nasiąkliwość ta wynosiła 8,9%.

Podsumowanie: Głównym czynnikiem wpływającym na właściwości zapraw był stopień zastąpienia kruszywa naturalnego kruszywem z żużla pomiedziowego (KP). Wraz ze wzrostem udziału KP następowało pogorszenie urabialności i trudności w zagęszczaniu zapraw, szczególnie przy poziomach 75% i 100% zastąpienia. Jednocześnie zwiększanie zawartości KP prowadziło do liniowego wzrostu gęstości zapraw. W początkowym okresie dojrzewania obserwowano spadek wytrzymałości na zginanie i ściskanie, natomiast po 28 dniach większość zapraw osiągała porównywalne lub wyższe wytrzymałości względem próbki referencyjnej. Najwyższe wartości wytrzymałości na ściskanie oraz zginanie po 28 dniach uzyskano dla zapraw z wysokim udziałem KP (75-100%). Zastosowanie kruszywa pomiedziowego przyczyniało się również do obniżenia nasiąkliwości zapraw, szczególnie dla poziomów 75% i 100% zastąpienia. Wszystkie zaprawy spełniły wymagania normowe w zakresie wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania.

Badania przedstawione w niniejszym rozdziale nie były przedmiotem wcześniejszych publikacji naukowych i stanowią uzupełniający, autorski element rozprawy doktorskiej. Nie zostały one włączone do cyklu publikacji. Zamieszczenie wyników ma na celu rozszerzenie zakresu merytorycznego pracy oraz zapewnienie spójności i kompletności prowadzonych analiz badawczych.

5.4 Badania właściwości zapraw z dodatkiem stłuczki szklanej z recyklingu

Badania polegały na ocenie możliwości zastosowania stłuczki szklanej w zaprawach jako zamiennika kruszywa drobnego. Zweryfikowano przydatność kruszywa przygotowanego ze stłuczki szkła z butelek szklanych GL (Rys. 22) przez zastosowanie w zaprawach cementowych. Stłuczka została przygotowana ze szklanych butelek koloru brązowego. Krzywa uziarnienia kruszywa drobnego ze stłuczki szklanej odbiega od uziarnienia dla piasku wzorcowego. Zawiera więcej frakcji drobnych poniżej 1 mm i mniej frakcji powyżej 1 mm.



Rys. 22. Stłuczka szklana 0-2 mm.
Fotografia własna.

Ocenie podlegały zaprawy, których skład podstawowy zmieniał się poprzez redukcję ilość piasku wzorcowego wagowo o 25, 50, 75 i 100%. W Tab. 3 przedstawiono koncepcję składów granulometrycznych poszczególnych mieszanek zawierających zamiennika piasku normowego w postaci szkła z recyklingu.

Tab. 3. Skład zapraw cementowych modyfikowanych drobnym kruszywem ze stłuczki szklanej z recyklingu szklanych butelek.

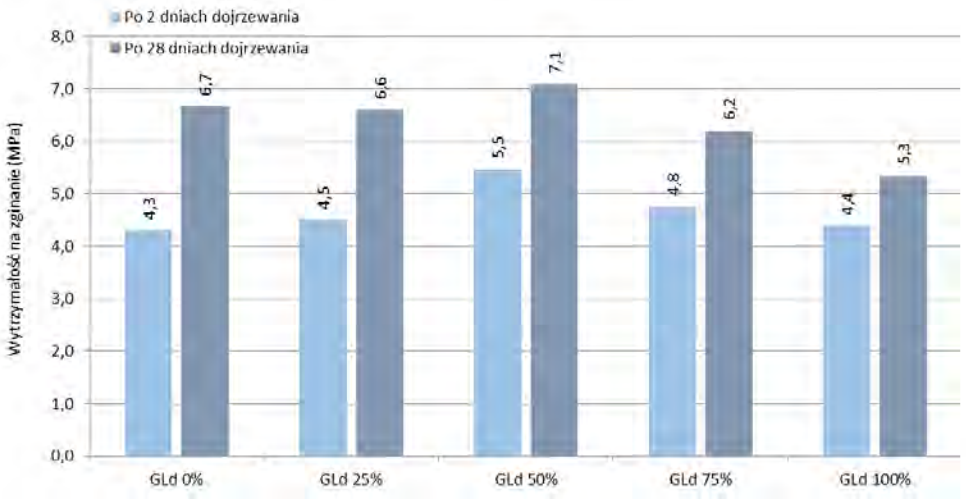
Symbol mieszanki	Skład zaprawy modyfikowanej szkłem z recyklingu o frakcji 0-2 mm (g)			
	Woda	CEM I 42,5R	Piasek wzorcowy	Kruszone szkło z recyklingu
GLd 0%	225	450	1350,0	0,0
GLd 25%			1012,5	337,5
GLd 50%			675,0	675,0
GLd 75%			337,5	1012,5
GLd 100%			0,0	1350,0

Opracowanie własne. Założenia niepublikowane.

Konsystencja. Wraz ze wzrostem zawartości dodatku GL średnica rozpływu maleje, spadek urabialności zapraw nie jest liniowy (średnica rozpływu maleje ze 160 mm do 105 mm). Największy spadek konsystencji odnotowano w przydatku zawartości od 50% do 100%. Przy zawartości stłuczki szklanej równej 100% uzyskano najmniejszą średnicę rozpływu zaprawy. Duża ilości mielonego szkła wpływa na pogorszenie urabialności zapraw cementowych. Może to jednak wpłynąć na poprawę parametrów wytrzymałościowych jak w przypadku obserwowanych wzrostów wytrzymałości zapraw z dodatkiem mielonego szkła jako substytutu cementu. Trudność zagęszczania zapraw o niskiej płynności może prowadzić do powstawania pustek powietrznych i niejednorodności w strukturze zaprawy, co wpływa na wytrzymałość na zgnanie i ściskanie.

Gęstość. Odmiennie niż w przypadku drobnego kruszywa z żużla pomiedziowego wzrost zawartości kruszonego szkła powodował spadek gęstości badanych zapraw. Wyjątek stanowiła seria próbek z 25% kruszonego szkła badana w 28 dniu dojrzewania. Gęstość zaprawy w tym przypadku wzrosła o 4 kg/m^3 względem próbki referencyjnej. Przyrost ten mieści się w granicy błędu pomiarowego metody i jest nieznaczący dla oceny wpływu dodatku na gęstość zapraw. Maksymalna różnica w gęstości względem próbki referencyjnej wyniosła 4% w przypadku wytrzymałości 2 dniowej i 3% w przypadku wytrzymałości 28 dniowej. Przyrost gęstości zapraw zmieniał się liniowo od ok. 2240 do ok. 2160 kg/m^3 wraz ze wzrostem procentowej zawartości dodatku w składzie poszczególnych mieszanek.

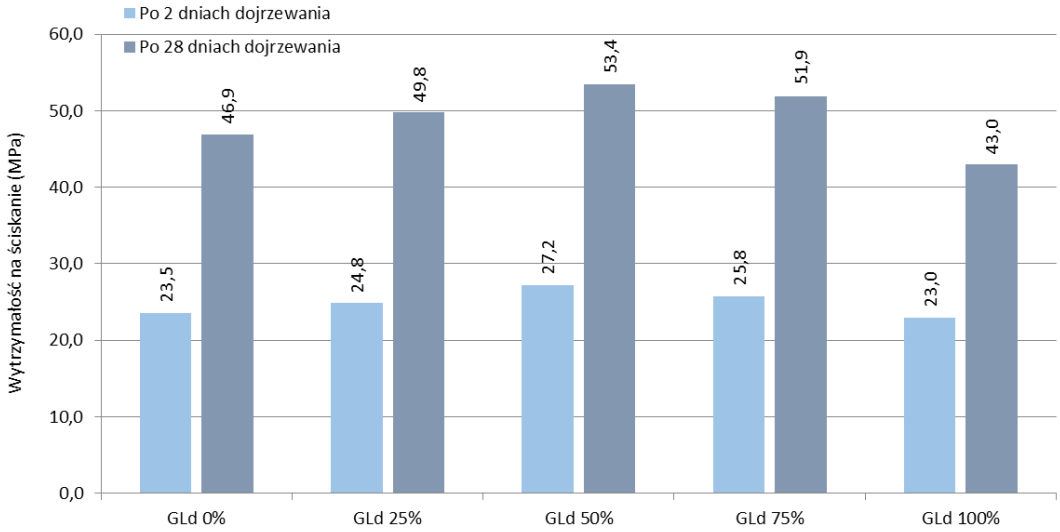
Wytrzymałości na zginanie. Na Rys. 23 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na zginanie zapraw. Maksymalny przyrost wytrzymałości na zginanie zaprawy po 2 dniach dojrzewania odnotowano w przypadku próbek serii GLd 50%, wyniósł on 27% względem próbki referencyjnej GLd 0%. W przypadku pozostałych serii nie odnotowano spadku wytrzymałości na zginanie względem próbki porównawczej. W przypadku wytrzymałości na zginanie zaprawa po 28 dniach dojrzewania maksymalny przyrost wytrzymałości na zginanie odnotowano również dla serii modyfikowanej 50% zawartością szkła. Przyrost wytrzymałości wyniósł 6 %. W przypadku serii zawierającej dodatek na poziomie 25, 75, i 100%, spadki wytrzymałości wyniosły odpowiednio 1, 7 i 20 %.



Rys. 23. Wytrzymałość na zginanie zapraw cementowych modyfikowanych kruszywem ze stłuczki szklanej z recyklingu.

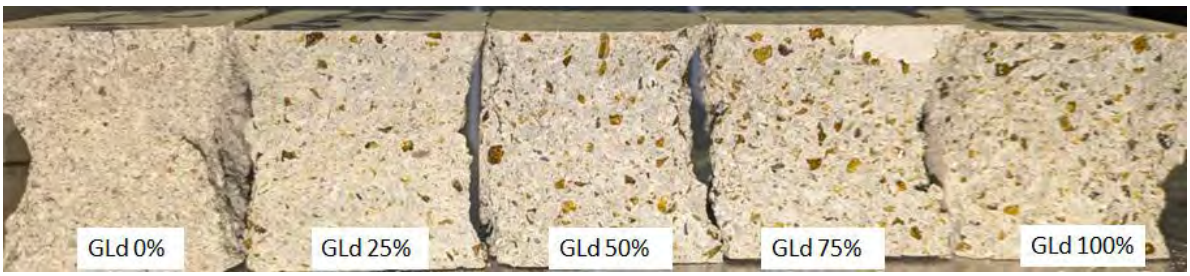
Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.

Wytrzymałości na ściskanie. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie zaprezentowano na Rys. 24. W przypadku zapraw pielęgnowanych przez 2 i 28 dni zawierających w swoim składzie do 75% dodatku, odnotowano przyrosty wytrzymałości na ściskanie zapraw względem próbki referencyjnej. Dla wytrzymałości wczesnej zapraw o zawartości dodatku 25, 50, 75% odnotowano wzrost wytrzymałości o 5, 16 i 9% oraz spadek wytrzymałości na ściskanie o 2% serii zwierającej 100% szkła. W przypadku wytrzymałości 28 dniowej dla zapraw o zawartości dodatku 25, 50, 75% odnotowano wzrost wytrzymałości o 6, 14 i 11% oraz spadek wytrzymałości na ściskanie o 8% serii zawierającej 100% GL. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, iż wszystkie serie zapraw uzyskały wytrzymałość wymaganą przez normę dla klasy cementu CEM I 42,5R. Na Rys. 25 przedstawiono próbki po badaniu wytrzymałości na ściskanie.



Rys. 24. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych modyfikowanych kruszywem ze stłuczki szklanej z recyklingu.

Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.



Rys. 25. Próbki po badaniu wytrzymałości na ściskanie zapraw modyfikowanych drobnym kruszywem ze stłuczki szklanej.

Fotografia własna - niepublikowana.

Nasiąkliwość. Najwyższą nasiąkliwość zaprawy odnotowano w przypadku zaprawy niezawierającej w swoim składzie kruszywa ze szkła z recyklingu. Najniższą nasiąkliwość odnotowano dla zaprawy zawierającej 100% kruszywa z recyklingu szkła. Nasiąkliwość ta wyniosła 7% i była niższa o 21% względem zaprawy wzorcowej. Zaprawy zawierające w swoim składzie 25, 50 i 75% kruszywa ze szkła z recyklingu wykazywały nasiąkliwości równe 8,4, 8,3 i 7,2%. Odpowiadało to procentowemu spadkowi nasiąkliwości względem próbki referencyjnej o 6, 7 i 19%.

Podsumowanie: Badania wykazały, że wprowadzenie drobnego kruszywa ze stłuczki szklanej do zapraw cementowych wpływa na ich właściwości fizyczne i mechaniczne. Wzrost udziału szkła w zaprawie prowadził do obniżenia urabialności, szczególnie przy zawartości powyżej 50%, co utrudniało zagęszczenie mieszanek i mogło powodować powstawanie pustek powietrznych. Gęstość zapraw malała wraz ze wzrostem dodatku szkła, od około 2240 kg/m³ dla zaprawy wzorcowej do 2160 kg/m³ przy pełnym zastąpieniu piasku. Maksymalny przyrost wytrzymałości na zginanie po 2 dniach odnotowano dla zapraw z 50% stłuczki szklanej (27%), a po 28 dniach wyniósł on 6%. Wytrzymałość na ściskanie wzrosła dla zapraw zawierających 25–75% dodatku szkła, natomiast przy pełnym zastąpieniu piasku obserwowano niewielki spadek, przy czym wszystkie serie spełniały wymagania normowe po 28 dniach dojrzewania. Nasiąkliwość zmniejszała się wraz ze wzrostem udziału szkła, osiągając minimalną wartość 7% przy 100% dodatku. Analiza wyników wskazuje, że optymalnym zakresem zastosowania stłuczki szklanej w zaprawach cementowych jest 50–75% zastąpienia piasku naturalnego.

Badania przedstawione w niniejszym rozdziale nie były przedmiotem wcześniejszych publikacji naukowych i stanowią uzupełniający, autorski element rozprawy doktorskiej. Nie zostały one włączone do cyklu publikacji. Zamieszczenie wyników ma na celu rozszerzenie zakresu merytorycznego pracy oraz zapewnienie spójności i kompletności prowadzonych analiz badawczych.

5.5 Badania właściwości betonów modyfikowanych grubym kruszywem pomiedziowym [P2]

Celem pracy była weryfikacja możliwości zastąpienia naturalnego kruszywa granitowego (KG), kruszywem z żużla pomiedziowym KP (Rys. 26). Głównym celem było zagospodarowanie kruszyw z odpadów pomiedziowych jako materiału mogącego w znaczącym stopniu ograniczyć wydobycie naturalnych kruszyw i zasępienie ich przez kruszywa poflotacyjne.



Rys. 26. Kruszywo z żużla pomiedziowego.
Fotografia własna.

Wykonano 5 mieszanek betonowych z różną zawartością kruszywa pomiedziowego. Podmianie podlegały kruszywa frakcji 2-8 i 8-16 w następujących ilościach: mieszanka kontrolna PI2 - 0%, PI3 - 25%, PI4 - 50%, PI5 - 75%, PI6 - 100% KP).

Zbadano wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość, mrozoodporność i gęstość betonu. Dla wszystkich betonów oznaczono gęstość mieszanki betonowej, konsystencje mieszanki betonowej oraz zawartość powietrza. Obszerną część pracy stanowiło oznaczenie właściwości kruszyw. Wyniki badań właściwości kruszyw przedstawiono w Tab. 4.

Tab. 4. Wyniki badań właściwości kruszyw.

Wyniki badań właściwości kruszyw												
Rodzaj kruszyw*	Frakcja kruszywa	Oznaczenie wytrzymałości kruszywa na miażdżenie (%)	Oznaczenie nasiąkliwości kruszywa (%)	Oznaczenie mrozoodporności kruszywa w wodzie (%)	Oznaczenie mrozoodporności kruszywa w soli (%)	Oznaczenie kształtu ziaren kruszywa (%)	Oznaczenie zawartości zanieczyszczeń obcych (%)	Oznaczenie zawartości grudek gliny (%)	Oznaczenie rozpadu żelazowego kruszywa (%)	Oznaczenie gęstości nasypowej kruszywa (t/m³)	Oznaczenie gęstości właściwej kruszywa w piknometrze (t/m³)	Oznaczenie zawartość ziaren słabych kruszywa (%)
KG	2÷4	-	-	-	-	-	-	-	-	1,31	-	-
KG	4÷8	10,6	-	0,10	0,07	13,5	0,0	0,0	0,0	1,33	-	-
KG	8÷16	9,7	0,6	0,10	0,10	10,5	0,04	0,0	0,0	1,40	2,63	13,9
KP	2÷4	-	-	-	-	-	-	-	-	1,53	-	-
KP	4÷8	8,0	-	0,17	0,07	19,4	0,05	0,0	0,0	1,53	-	-
KP	8÷16	8,7	0,4	0,14	0,08	12,1	0,07	0,0	0,0	1,58	3,08	6,4
Piasek	0÷2	-	-	-	-	-	0,17	-	-	1,56	-	-
*KG - kruszywo granitowe; KP- kruszywo pomiedziowe; Piasek - piasek naturalny płukany												

Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.

Reaktywność alkaliczna. Zbadano reaktywność alkaliczną kruszywa z żużla pomiedziowego. Wyniki badań przedstawiono w Tab. 5. Ocenę reaktywności alkalicznej kruszywa granitowego przedstawiono w Tab. 6.

Tab. 5. Ocena reaktywności alkalicznej żużla pomiedziowego.

Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą przyśpieszoną						Średnia ekspansja po 14 dniach
Oznaczenie próbki	Zmiana długości próbek (%)					
	L_0	L_3	L_7	L_{10}	L_{14}	
KR. POMIEDZI/25-1	0,000	0,002	0,006	0,011	0,015	0,02%
KR. POMIEDZI/25-2	0,000	0,003	0,007	0,012	0,017	
KR. POMIEDZI/25-3	0,000	0,004	0,009	0,013	0,018	

Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.

Tab. 6. Ocena reaktywności alkalicznej kruszywa granitowego z kopalni granitu Rogoźnica II.

Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą przyśpieszoną						Średnia ekspansja po 14 dniach
Oznaczenie próbki	Zmiana długości próbek (%)					
	L_0	L_3	L_7	L_{10}	L_{14}	
KR. GRANITOWE/25-1	0,000	0,007	0,023	0,043	0,063	0,06%
KR. GRANITOWE/25-2	0,000	0,009	0,024	0,046	0,064	
KR. GRANITOWE/25-3	0,000	0,009	0,021	0,052	0,067	

Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.

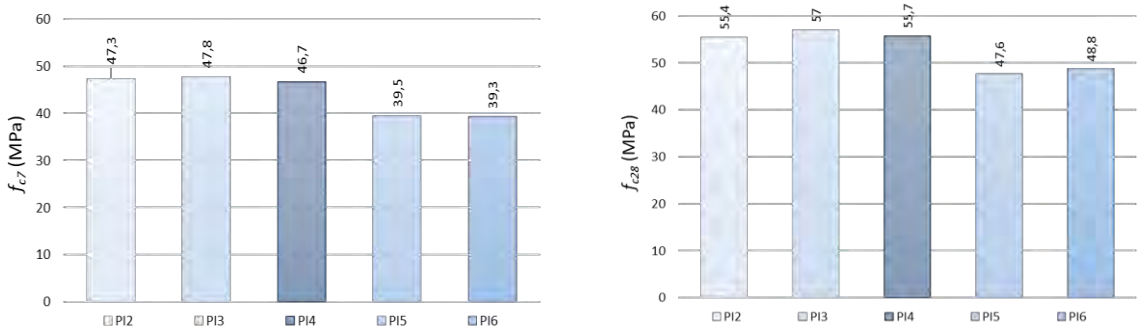
Ekspansja próbki dla kruszywa niereaktywnego (R0) przewidzianego do stosowania w betonie, powinna wynosić w przypadku kruszywa grubego ≤ 0,10%. Kruszywo pomiedziowe spełniło wymaganie niezbędne do zaklasyfikowania jako kruszywo niereaktywne Klasy R0. Kruszywa granitowego również zaklasyfikowano jako kruszywo niereaktywne. W porównaniu z kruszywem z żużla pomiedziowego ekspansja KG była wyraźnie wyższa.

Konsystencja. Otrzymane wyniki wskazują na wyraźny wzrost konsystencji mieszanki betonowej wraz ze zwiększeniem ilości kruszywa pomiedziowego. Najwyższą urabialność mieszanki betonowej odnotowano dla składu, w którym dokonano 100% zamiany kruszywa granitowego kruszywem pomiedziowym. Uzyskano konsystencje S3 (opad stożka 120 mm). W przypadku mieszanki zawierającej w swoim składzie 75% kruszywa pomiedziowego odnotowano również konsystencję S3, a opad stożka wynosił 110mm. Pozostałe mieszanki zaklasyfikowanego do klasy konsystencji S2.

Zawartość powietrza. Wszystkie mieszanki wykazywały zawartość powietrza na poziomie powyżej 4%. Najniższą zawartość powietrza oznaczono dla mieszanki niezawierającej KP (4,2%) wraz ze wzrostem zawartości KP odnotowano następujące zawartości powietrza 4,3; 4,5; 4,5 i 4,4%.

Wytrzymałość na ściskanie. Na Rys. 27 przedstawiono wytrzymałość na ściskanie betonów po 7 i 28 dniach dojrzewania. Wszystkie badane betony wykazały wysoką wytrzymałość na ściskanie już po 7 dniach dojrzewania. Tendencja otrzymanych wyników wytrzymałości po 7 dniach dojrzewania znalazła swoje odzwierciedlenie w betonie dojrzewającym 28 dni. W przypadku betonów po 7 dniowej pielęgnacji uzyskano wytrzymałości na ściskanie na poziomie 47,3 MPa. Dla betonów zawierających 25 i 50% żużla wartości te były porównywalne. Odnotowano zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie dla betonów z zawartością 75 i 100% (KP). Odnotowano przyrost wytrzymałości na ściskanie betonu zawierającego 25% żużla zarówno po 7 jak i po 28 dniach dojrzewania. Największy spadek wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania względem betonu wzorcowego uzyskano dla serii zawierającej 75% kruszywa z żużla pomiedziowego, a utrzymywał się on na poziomie 14%. Podobny rezultat uzyskano w przypadku zastąpienia 100% kruszywa granitowego kruszywem z żużla pomiedziowego, odnotowując spadek wytrzymałości o 12% względem próbki referencyjnej. Dodatkowo oznaczono wytrzymałość na ściskanie próbek po 3000 dniach dojrzewania w wodzie. Wyniki badań wytrzymałości dla poszczególnych serii przedstawiono w Tab. 7. W literaturze nie są znane badania betonu z zamiennikiem kruszywa pomiedziowego o frakcjach 2-8 i 8-16 mm w podobnej konfiguracji po tak

długim czasie dojrzewania. Najwyższą wytrzymałość osiągnęły betony zawierające 50% KP . Najniższą wytrzymałość oznaczono w przypadku betonów zawierających 100% zamiennika kruszywa granitowego. W tym przypadku różnica wytrzymałości względem próbki referencyjnej wynosiła zaledwie 4,5 MPa. Zanotowano bardzo duży przyrost wytrzymałości pomiędzy 28. a 3000. dniem, przy czym najwyższy stosunek $f_{c,3000}/f_{c,28}$ osiągnęły próbki zawierające 75% KP. Dla $f_{c,3000}/f_{c,7}$ najwyższy przyrost również zanotowano dla próbek z 75% KP, który wyniósł 1,90.



Rys. 27. Wytrzymałość na ściskanie betonów cementowych po 7 i 28 dniach dojrzewania.
Opracowanie własne. Badania opublikowane w **[P2]**.

Tab. 7. Wytrzymałość na ściskanie betonu z różną zawartością kruszywa pomiedziowego po 3000. dniach dojrzewania (8 lat i 78 dni).

Symbol mieszanki	Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu $f_{c,3000}$ (MPa)	$f_{c,3000}/f_{c,28}$	$f_{c,3000}/f_{c,7}$
PI 2	78,0	1,41	1,65
PI 3	78,2	1,37	1,64
PI 4	79,2	1,42	1,70
PI 5	75,2	1,58	1,90
PI 6	73,5	1,51	1,87

Opracowanie własne. Badania niepublikowane.

Nasiąkliwość. Kruszywo pomiedziowe nie ma negatywnego wpływu na nasiąkliwość betonu cementowego. Próbka referencyjna wykazywała nasiąkliwość na poziomie 6%. Wraz ze wzrostem zawartości KP w poszczególnych seriach odnotowano następujące wartości nasiąkliwości: dla serii zawierające 25% żużla wynosiła 5,8% a dla pozostałych 5,9%.

Gęstość. Zgodnie z oczekiwaniami gęstość właściwa kruszywa pomiedziowego wpływa na gęstość betonu. Najwyższą gęstość betonu (2512 kg/m^3) odnotowano dla serii zawierającej 100% KP. Gęstość betonu spadała wraz ze zmniejszeniem udziału kruszywa z żużla pomiedziowego w poszczególnych składach i przedstawiała się następująco: 2548 kg/m^3 (PI5), 2444 kg/m^3 (PI4), 2408 kg/m^3 (PI3) i 2332 kg/m^3 dla próbki referencyjnej. W przypadku betonów z kruszywem z żużla pomiedziowego zaobserwowano oczekiwany wzrost gęstości betonu wraz ze wzrostem zawartości kruszywa w mieszance. Różnice gęstości betonu wynikają z gęstości właściwej żużla pomiedziowego.

Mrozoodporność. Betony z rożną zawartością kruszywa pomiedziowego oceniono od względem odporności na działanie mrozu. Dla betonu referencyjnego nie zawierającego w swym składzie kruszywa pomiedziowego (PI2) odnotowana przyrost wytrzymałości na ściskanie na poziomie 0,06% po badaniu mrozoodporności. Najwyższy spadek wytrzymałości betonu po badaniu mrozoodporności odnotowano dla betonu zawierającego 50% kruszywa pomiedziowego (PI4), wynosił on 4%. Należy stwierdzić, iż wszystkie betony spełniły wymagania dla stopni mrozoodporności F150. Żadna z badanych próbek nie wykazała spadku masy powyżej wymagania stawianego przez normę. Maksymalny przyrost masy wyniósł 0,12% dla próbki wzorcowej PI2. Podczas oceny makroskopowej próbek po badaniu mrozoodporności na żadnej z próbek nie stwierdzono występowania spękań.

Podsumowanie: Badania wykazały, że kruszywo z żużla pomiedziowego (KP) może skutecznie zastąpić naturalne kruszywo granitowe (KG) w betonach cementowych. Wprowadzenie KP poprawia konsystencję mieszanki betonowej, zwiększając urabialność i zawartość powietrza, a także wpływa na wzrost gęstości betonu wraz ze wzrostem udziału dodatku. Nasiąkliwość betonu nie ulega znaczącej zmianie, a wszystkie badane mieszanki wykazały pełną mrozoodporność (F150). Analiza reaktywności alkalicznej potwierdziła, że kruszywo KP jest niereaktywne (klasa R0), podobnie jak kruszywo granitowe. Wyniki wskazują, że KP może być stosowane jako trwały i bezpieczny zamiennik kruszywa naturalnego, przyczyniając się do ograniczenia wydobycia kruszyw naturalnych i zagospodarowania odpadów przemysłowych.

5.6 Badania właściwości betonów z dodatkiem granulatu z gumy SBR [P8]

Celem badań była ocena możliwości zastosowania granulatu z gumy SBR pochodzącej z recyklingu oraz weryfikacji przydatności odpadu jako dodatku do modyfikacji właściwości mechanicznych betonu cementowego. Badano wpływ zastosowania gumy w taki sposób aby guma stanowiła wypełniacz w mieszance betonowej. W Tab. 8 przedstawiono składy poszczególnym mieszanek betonowych.

Tab. 8. Projektowany skład betonu cementowego modyfikowanego gumą SBR.

Nazwa materiału	Skład mieszanki betonowej z różną zawartością gumy (kg/m^3)			
	PM 1 (0% gumy)	PM 2 (5% gumy)	PM 3 (10% gumy)	PM 4 (20% gumy)
Domieszka uplastyczniająca	2,16	2,05	1,94	1,72
Woda	150	142,5	135	120
Cement CEM I 42,5R	270	256	243	216
Piasek 0/2mm	850	807	765	680
Kruszywo 2/8mm	500	475	450	400
Kruszywo 8/16mm	570	541	513	456
Popiół lotny	75	71	67	60
Guma SBR granulat	-	27,5	55	110

Założenia opublikowane w artykule **[P8]**.

Przyjęto 4 mieszanki betonowe z różną zawartością granulatu gumowego SBR (Rys. 28) w swoim składzie. Poddano ocenie następujące parametry mieszanki betonowej: konsystencję, zawartość powietrza i gęstość. Wykonane betony poddano ocenie cech fizycznych i mechanicznych: wytrzymałość na ściskanie i zginanie, gęstość, nasiąkliwość, mrozoodporność, głębokość penetracji wody pod ciśnieniem, moduł Young'a i wskaźnik kruchości.



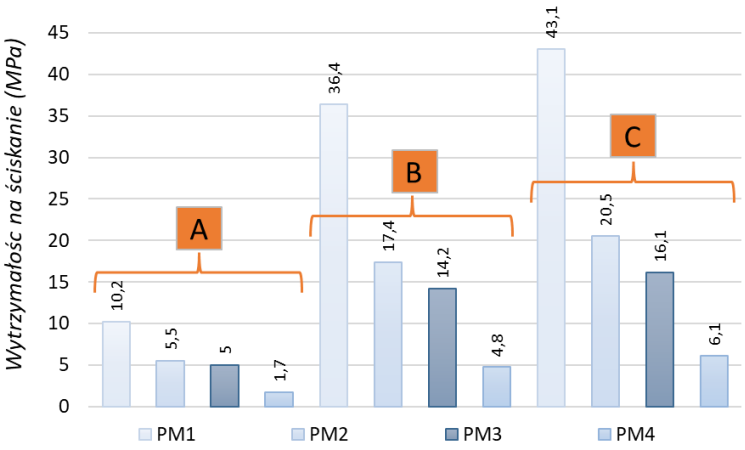
Rys. 28. Granulat gumowy SBR.
Fotografia własna.

Konsystencja. Najwyższą konsystencję mieszanki betonowej odnotowano dla składu z 20% gumy Uzyskano konsystencje S3 (opad stożka 130 mm). W przypadku mieszanki zawierającej w swoim składzie 10 i 20% granulatu gumowego określono konsystencję na poziomie klasy S2 a opad stożka wynosił odpowiedni 70 i 80 mm. Mieszanka kontrolna z opadem stożka na poziomie 50 mm została zaklasyfikowana jako klasa konsystencji S2.

Zawartość powietrza. Zawartość powietrza w mieszance kontrolnej wynosiła 5,5%. Mieszanki z 5, 10 i 20% granulatu gumowego wykazały dużą zawartość powietrza. W próbce z 5% granulatu zawartość powietrza wynosiła 12%. Seria zawierająca 10% granulatu gumowego wynosiła 20% a w próbce z 20% dodatku 11%. Uzyskane wyniki są spowodowane dużą odkształcalnością gumy, spadkiem urabialności i brakiem możliwości właściwego zagęszczenia mieszanki. Wysoka zawartość powietrza w mieszance betonowej wpływa negatywnie na reologię betonu oraz na parametry wytrzymałości na ściskanie betonów.

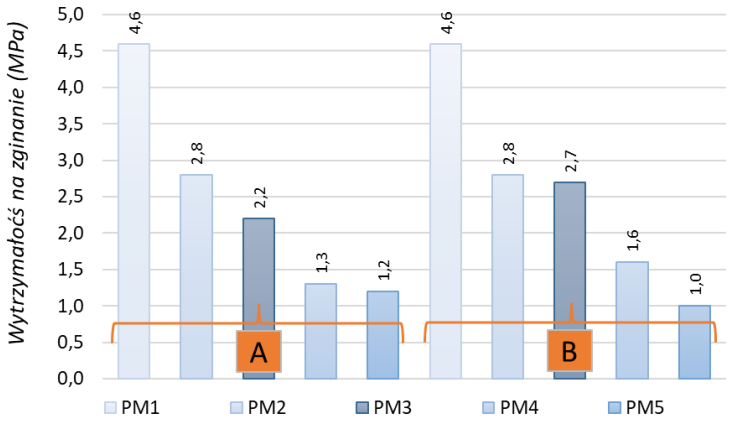
Gęstość. Najwyższy spadek gęstości wykazała mieszanka zawierająca 20% granulatu gumowego w swoim składzie (1769 kg/m^3). Mieszanka niezawierająca gumy miała gęstość równą 2245 kg/m^3. Mieszanki zawierające 5% i 10% cechowały się gęstością na poziomie 2030 i 1958 kg/m^3.

Wytrzymałość na ściskanie. Na Rys. 29 przedstawiono wytrzymałość na ściskanie betonów w różnym okresie dojrzewania. W przyjętych założeniach projektowany beton miał osiągnąć wymagania dla klasy betonu C25/30 (B30). Oznaczono wytrzymałość po 7, 28 i 56 dniach dojrzewania. Wszystkie modyfikowane betony, wykazały spadki wytrzymałość na ściskanie względem próbki referencyjnej po 7 dniach dojrzewania. Maksymalny spadek wytrzymałości wyniósł 83% w przypadku betonu zawierającego 20% gumy. Pozostałe betony osiągnęły około 50% wytrzymałości betonu wzorcowego. Wszystkie betony modyfikowane granulatem gumowym nie spełniły projektowanej klasy wytrzymałości na ściskanie betonu. Odnotowano znaczące spadki wytrzymałości na ściskanie betonu po 28 dniach dojrzewania. Największy spadek wytrzymałości względem betonu wzorcowego uzyskano dla serii zawierającej 20% granulatu gumowego, odnotowując spadek wytrzymałości o 87% względem próbki referencyjnej. Wytrzymałości na ściskanie betonu po 56 dniach dojrzewania nie przyniosły poprawy wytrzymałości na ściskanie. Spadek wytrzymałości wyniósł 52% dla serii z 5% gumy, 61% dla serii z 10% gumy i 87% dla serii z 20% gumy.



Rys. 29. Wytrzymałość na ściskanie betonów cementowych po 7 [A], 28 [B] i 56 [C] dniach dojrzewania modyfikowanych różną zawartością granulatu gumowego.
Opracowanie własne. Badania opublikowane w **[P8]**.

Wytrzymałości na zginanie. Oznaczono wytrzymałość na zginanie betonu po 28 i 56 dniach dojrzewania. Wyniki badań zaprezentowana na Rys. 30. Uzyskane wyniki wytrzymałości na zginanie pokrywają się z tendencją spadkową wytrzymałości na ściskanie. Najwyższe spadki wytrzymałości na zginanie sięgają 72%. Wynik ten odnotowano dla serii zawierającej 20 % granulatu gumowego badanego po 28 dniach dojrzewania. W przypadku wytrzymałości na zginanie po 56 dniach dojrzewania maksymalny spadek wyniósł dla tej samej serii wyniósł 65%. W przypadku próbek z zawartością 5% dodatku gumy spadki wyniosły odpowiednio 40% zarówno w przypadku wytrzymałości po 28 i 56 dniach dojrzewania.



Rys. 30. Wytrzymałość na zginanie próbek betonowych modyfikowanych różną zawartością granulatu gumowego po 28 [A] i 56 [B] dniach dojrzewania.
Opracowanie własne. Badania opublikowane w **[P8]**

Nasiąkliwość. Beton zawierający 20% gumy wykazał nasiąkliwość zbliżoną do próbki wzorcowej. Nasiąkliwość ta wyniosła 6,3%. Seria zawierająca 10% granulatu wykazał niższą nasiąkliwość od betonu referencyjnego o 0,5%. W przypadku nasiąkliwości betonu z 5% zawartością gumy odnotowano przyrost nasiąkliwości o 0,7%. Seria zawierająca 20% granulatu wykazał porównywalną nasiąkliwość z próbką referencyjną (6,2%).

Gęstość. Nie odnotowano znaczących zmian gęstości betonu w zależności od czasu jego dojrzewania. Niezależnie od przyjętego czasu pielęgnacji (7, 28 czy 56 dni) tendencja spadku gęstości wraz ze zwiększeniem się ilości granulatu w poszczególnych okresach pielęgnacji jest taka sama. Największy

spadek gęstości wykazuje próbka zawierająca 20 % granulatu gumowego i wynosi on około 19 % masy względem próbki referencyjnej. Pozostałe spadki gęstości wynoszą około 8-9% dla betonów z 5% zawartością granulatu i około 11-13% dla betonów z 10% zawartością granulatu.

Mrozoodporność. Dla betonu referencyjnego odnotowano spadek wytrzymałości na ściskanie po badaniu mrozoodporności na poziomie 17,4%. W przypadku pozostałych betonów uzyskano mniejszy spadek wytrzymałości. Najniższy spadek wytrzymałości betonu po badaniu mrozoodporności odnotowano dla betonu zawierającego 20% gumy. Wynosił on 9,9%. Dla betonów zawierających 55% granulatu spadek wytrzymałości wynosił 12,1%, a dla betonów z 10% dodatkiem 10,8%. Należy stwierdzić, iż wszystkie betony spełniły wymagania dla stopnia mrozoodporności F150. Wszystkie z badanych serii wykazały przyrost masy po badaniu mrozoodporności. W przypadku betonu cementowego nie modyfikowanego dodatkami z odpadów, przyrost masy może świadczyć o przebiegającym procesie degradacji struktury betonu wewnątrz próbek. W rozpatrywanym przypadku przyrost masy po badaniu należy upatrywać w nietypowej strukturze betonu wypełnianej znaczną ilością granulatu gumowego w swojej objętości. Wytworzone przestrzenie wypełnione podatną gumą mogącą ulegać odkształceniu najprawdopodobniej ułatwiły wniknięcie wody do wnętrza próbki co spowodowało w konsekwencji przyrost masy próbek. Na powierzchni próbek nie oznaczono uszkodzeń lub spękań, które mogłyby świadczyć o degradacji matrycy betonowej i zniszczeń powstałych w strukturze betonu. Maksymalny przyrost masy wyniósł 0,58% dla próbki zawierającej 5% gumy. Na trzech próbkach z serii referencyjnej stwierdzono niewielkie odpryski, na dwóch drobne rysy. Na próbkach z serii zawierającej 5% gumy jedna próbka wykazywała drobne złuszczenia, inna drobne rysy na swojej powierzchni. Można zauważyć, iż wraz ze zwiększeniem zawartości gumy w składzie odnotowano zmniejszenie ilości zniszczeń na powierzchni podróbek. Na pozostałych próbkach innych defektów nie stwierdzono. Podczas badań wytrzymałości na ściskanie zaobserwowano zdolność betonu do znacznych odkształceń i powrotu do pierwotnego kształtu. Zjawisko było wyraźnie widoczne dla serii betonów z 20% dodatkiem granulatu gumowego w składzie. W związku z przeprowadzonymi obserwacjami wpływu zawartości gumy na odkształcalność próbek postanowiono ocenić kruchość materiału zawierającego znaczną ilość gumy w swoim składzie.

Wskaźnik kruchości. Niższa wartość wskaźnika kruchości oznacza większą skłonność do nagłego, niestabilnego pękania bez istotnych odkształceń. Parametr ten stosuje się w analizach nośności i stanów granicznych do określenia momentu inicjacji i propagacji rys. Modyfikacja składu mieszanki, np. przez zastosowanie włókien lub dodatku gumy pozwala wpływać na wartość wskaźnika i charakter pracy betonu. Wyniki oznaczenia kruchości betonu modyfikowane dodatkiem granulatu gumowego przedstawiono w Tab. 9.

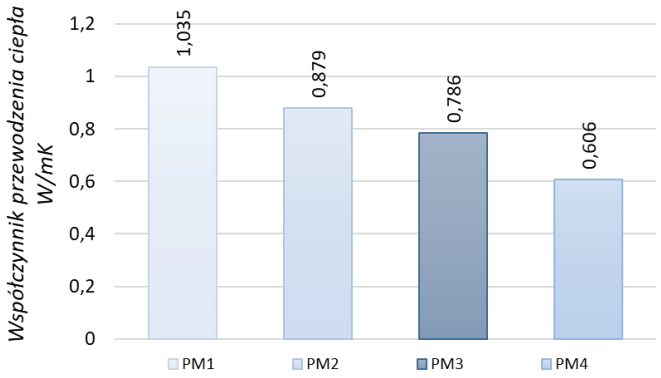
Tab. 9. Wskaźnik kruchość betonu modyfikowanego gumą SBR po 28 dniach dojrzewania.

	PM 1 (0% Gumy)	PM 2 (5% Gumy)	PM 3 (10% Gumy)	PM 4 (20% Gumy)
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania (MPa)	36,3	17,4	14,2	4,8
Wytrzymałość na zginanie po 28 dniach dojrzewania (MPa)	4,6	2,8	2,2	1,2
Wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach dojrzewania (MPa)	43,1	20,5	16,1	6,1
Wytrzymałość na zginanie po 56 dniach dojrzewania (MPa)	4,6	2,8	2,7	1,6
Stosunek fct_{28} / fck_{28}	0,127	0,161	0,155	0,250
Stosunek fct_{56} / fck_{56}	0,107	0,137	0,168	0,262

Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.

Wraz ze zwiększającą się ilością granulatu gumowego następuje wzrost wskaźnika kruchości. Najwyższy wskaźnik kruchości odnotowano dla mieszanki zawierającej 20% granulatu gumowego w składzie mieszanki. Oznaczenie wskaźnika kruchości dla betonów modyfikowanych granulatem gumowym po 56 dniach dojrzewania, wykazał iż najwyższą kruchość ma beton nie zawierający w swym składzie granulatu gumowego. Najmniejszą kruchością cechuje się beton zawierający 20% granulatu gumowego w swoim składzie.

Współczynnik przewodzenia ciepła. Dla betonów modyfikowanych różną zawartością granulatu gumowego oznaczono współczynnik przewodzenia ciepła λ. Badanie przeprowadzono na trzech próbkach badawczych z wykorzystaniem aparatu FOX. Uzyskane wyniki współczynnika przewodzenia ciepła zostały zaprezentowane na Rys. 31.



Rys. 31. Współczynnik przewodności cieplnej dla betonu z różną zawartością granulatu gumowego po 28 dnach dojrzewania.
Opracowanie własne. Badania opublikowane w **[P8]**

Najwyższą przewodność cieplną oznaczono w przypadku betonów niezawierających dodatku w postaci granulatu gumowego. Najwyższą izolacyjność termiczną wykazywały betony zawierające 20% dodatku granulatu gumowego w swoim składzie. Pozostałe betony wykazywały również lepszą izolacyjność cieplną niż beton kontrolny niezawierający dodatku gumy.

Głębokości penetracji wody pod ciśnieniem. Oznaczenie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wykonano dla wszystkich badanych serii. Badanie wykonano na próbkach walcowych o średnicy 160 mm i wysokości około 160 mm. Próbki badawcze powstały przez przecięcie próbek walcowych o średnicy 160 mm i wysokości 320 mm. Badaniu poddano powierzchnie cięcia. Tak przygotowane próbki umieszczono w maszynie do badania głębokości penetracji wody pod ciśnieniem i przyłożono ciśnienie wody równe 500 ± 50 kPa przez 72 h. Po upływie 72h próbki zdjęto, rozłupano próbkę na pół w taki sposób, by pęknięcie powstało prostopadle do kierunku oddziaływania wody. Wartość głębokości penetracji wody pod ciśnieniem stanowi średnia arytmetyczna z dwóch oznaczeń. Betony zawierające 0, 5 i 10% granulatu gumowego wykazywał się dużą szczelnością. Uzyskane wyniki badań wskazują na pozytywny wpływ dodatku na poziomie do 10 %. Oznaczone wartości odpowiadały penetracji na poziomie 32, 39 i 31mm. Jedynie próbki zawierające 20% granulatu wykazała znacznie większą głębokość penetracji wody pod ciśnieniem (123 mm).

Podsumowanie: Badania wykazały, że dodatek granulatu gumowego SBR wpływa istotnie na właściwości betonów cementowych. Zwiększenie udziału gumy poprawia konsystencję mieszanki i zwiększa zawartość powietrza, jednocześnie obniżając gęstość betonu. Wytrzymałość na ściskanie i zginanie spada wraz ze wzrostem udziału gumy – największe spadki (do 87%) wystąpiły przy 20% dodatku, przez co betony modyfikowane nie spełniły wymagań klasy C25/30. Jednocześnie zwiększa się odkształcalność i zmniejsza kruchość materiału, co jest korzystne dla odporności na pękanie. Nasiąkliwość pozostaje na poziomie zbliżonym do betonu referencyjnego, a wszystkie badane

mieszanki wykazały mrozoodporność F150. Zawartość gumy powyżej 10% prowadzi do pogorszenia szczelności betonu, obserwowanego w znacznej penetracji wody pod ciśnieniem. Dodatek gumy zwiększa izolacyjność termiczną betonu. Wyniki wskazują, że granulat gumowy może być stosowany jako modyfikator poprawiający odkształcalność i izolacyjność termiczną betonu, jednak znaczne udziały (>10%) obniżają wytrzymałość i szczelność materiału.

5.7 Badania właściwości betonów z dodatkiem stłuczki szklanej.

Badania właściwości betonów z dodatkiem stłuczki szklanej (Rys. 32) zostały przeprowadzone w celu oceny możliwość stosowania szkła jako częściowego zamiennika kruszywa grubego w betonach cementowych. Dla zaprojektowanych składów betonu wykonano ocenę właściwości mieszanki betonowej i stwardniałych betonów. Oceniono konsystencję mieszanki betonowej, gęstość i zawartość powietrza. Wykonany beton poddano ocenie cech fizycznych i mechanicznych, określono: wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość i mrozoodporność betonu.



Rys. 32. Szkło z recyklingu.
Fotografia własna.

Przyjęto 5 mieszanek betonowych z różną zawartością stłuczki szklanej. Podmianie podlegały kruszywa frakcji 8-16 mm w następujących ilościach: 0, 25; 50, 75 i 100% szkła z recyklingu. W Tab. 10 przedstawiono zmiany zawartości żwiru naturalnego płukanego frakcji 8-16 zastępując go szkłem z recyklingu odpadów szklanych.

Tab. 10. Procentowa zawartość kruszyw zastosowana do produkcji mieszanek betonowych.

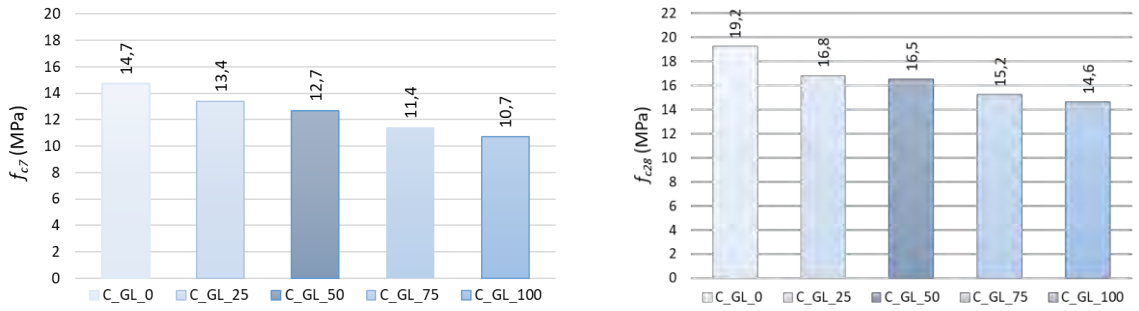
Rodzaj mieszanki betonowej	Cement / Woda / Piasek	Zawartość kruszywa naturalnego (żwir) (frakcja 2÷8)	Zawartość kruszywa naturalnego (żwir) (frakcja 8÷16)	Zawartość szkła z recyklingu (frakcja 8÷16)
C_GL_0%	100%	100%	100%	0%
C_GL_25%	100%	100%	75%	25%
C_GL_50%	100%	100%	50%	50%
C_GL_75%	100%	100%	25%	75%
C_GL_100%	100%	100%	0%	100%

Opracowanie własne – założenia niepublikowane.

Konsystencja. Najwyższą konsystencję mieszanki betonowej odnotowano dla składu C_GL_25 w którym dokonano 25% zamiany żwiru szkłem z recyklingu (30 mm). W przypadku wszystkich betonów uzyskano konsystencje S1. Opad stożka dla próbki referencyjnej wyniósł 20 mm, dla pozostałych mieszanek wynosił on 10 mm.

Gęstość. W przypadku betonów z kruszywem szklanym zaobserwowano nieznaczny spadek gęstości betonu wraz ze wzrostem zawartości odpadu w mieszance. Różnice mogą wynikać z podatności na zagęszczenie poszczególnych mieszanek. Wraz ze wzrostem ilości kruszywa szklanego w mieszance betonowej zaobserwowano gorsze zdolności do zagęszczania się mieszanki betonowej na stoliku wibracyjnym. Najwyższa różnica gęstości wynosiła 3% względem próbki referencyjnej i została zaobserwowana w mieszance C_GL_100%.

Wytrzymałość na ściskanie. Na Rys. 33 przedstawiono wytrzymałość na ściskanie betonów. Projektowany beton miał osiągnąć wymagania dla klasy betonu C12/15. Oznaczono wytrzymałość na ściskanie po 7 i 28 dniach dojrzewania. Wszystkie badane betony wykazały wysoką wytrzymałość na ściskanie już po 7 dniach dojrzewania. Wytrzymałość na ściskanie wynosiła od 10,7 do 14,7 MPa. Spadek wytrzymałości był liniowy wraz ze zwiększaniem ilości szkła. Najwyższą wytrzymałość odnotowano dla próbki niezawierającej dodatku szkła. Tendencja otrzymanych wyników wytrzymałości po 7 dniach dojrzewania znalazła swoje odzwierciedlenie w betonie dojrzewającym 28 dni. Maksymalny spadek wytrzymałości na ściskanie odnotowano dla betonu zawierającego 100% szkła jako zamiennika frakcji 8-16. Spadek ten wyniósł 27% względem próbki referencyjnej. Maksymalna różnica wytrzymałości na ściskanie względem próbki referencyjnej wynosiła 4,6 MPa, a odnotowano ją w przypadku betonu zawierającego w składzie 100% szkła z recyklingu.



Rys. 33. Wytrzymałość na ściskanie po 7 i 28 dniach dojrzewania modyfikowanych różną zawartością szkła z recyklingu.

Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.

Nasiąkliwość. Oznaczono nasiąkliwość betonów modyfikowanych różną zawartością szkła z recyklingu. W przypadku wszystkich badanych serii odnotowano zmniejszenie nasiąkliwości wraz ze wzrostem ilości szkła w składzie betonu. Próbka referencyjna miała nasiąkliwość na poziomie 8,5%. Poprawę nasiąkliwości odnotowano dla serii próbek C_GL_25, C_GL_50, C_GL_75, C_GL_100 nasiąkliwość ta wynosiła odpowiednio 8,1; 7,7; 7,8 i 7,7%.

Mrozoodporność. Po badaniu mrozoodporności stwierdzono przyrost masy wszystkich badanych serii. Na próbkach serii C_GL_0, C_GL_25, C_GL_75, C_GL_100 podczas oceny makroskopowej, odnotowano występowanie siatki rys. Przyrost masy może oznaczać zniszczenie wewnętrze struktury betonu. W przydatku uzyskanych wyników należy domniemać, iż doszło do początkowej fazy destrukcji struktury betonu. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, iż wszystkie serie spełniły wymaganie dotyczące spadku wytrzymałości betonu po badaniu mrozoodporności dla stopnia F25. Interesującymi wynikami cechują się poszczególne serie. Najniższy spadek wytrzymałości (2,0%) osiągnięto dla serii zawierającej 50% szkła w swoim składzie oraz najniższy przyrost masy wynoszący 0,04%. Maksymalny przyrost masy wyniósł 0.14% (seria C_GL_0). Wyniki dla serii z zawartością 25 i 50 % wykazały

również mniejszy spadek wytrzymałości po badaniu mrozoodporności względem próbki referencyjnej C_GL_0. Spadki te wynosiły 12,2% dla próbki C_GL_25 oraz 7,3% dla C_GL_75. Beton zawierający 100% szkła z recyklingu uzyskał spadek wytrzymałości na poziomie 16,6%, co było wynikiem porównywalnym z próbką C_GL_0 z wartością 16,4%.

Podsumowanie: Badania wykazały, że stłuczka szklana może zastępować kruszywo grubego w betonach cementowych. Zwiększenie udziału szkła obniżało gęstość mieszanki i utrudniało zagęszczanie, ale nie powodowało istotnych problemów z urabialnością. Wytrzymałość na ściskanie malała liniowo wraz ze wzrostem udziału szkła, przy czym maksymalny spadek (27%) odnotowano przy 100% zastąpieniu kruszywa. Nasiąkliwość betonu zmniejszała się wraz z udziałem szkła, a wszystkie badane mieszanki spełniły wymagania mrozoodporności F25, przy czym najkorzystniejsze parametry uzyskano dla betonów z 50% szkła, charakteryzujących się minimalnym spadkiem wytrzymałości (2%). Wyniki wskazują, że stłuczka szklana może być stosowana jako dodatek do betonu poprawiający szczelność i odporność na niskie temperatury przy ograniczonym wpływie na wytrzymałość. Wyższe udziały (75–100%) powodują większy spadek wytrzymałości, choć nadal mieszczą się w klasie C12/15.

Badania przedstawione w niniejszym rozdziale nie były przedmiotem wcześniejszych publikacji naukowych i stanowią uzupełniający, autorski element rozprawy doktorskiej. Nie zostały one włączone do cyklu publikacji. Zamieszczenie wyników ma na celu rozszerzenie zakresu merytorycznego pracy oraz zapewnienie spójności i kompletności prowadzonych analiz badawczych.

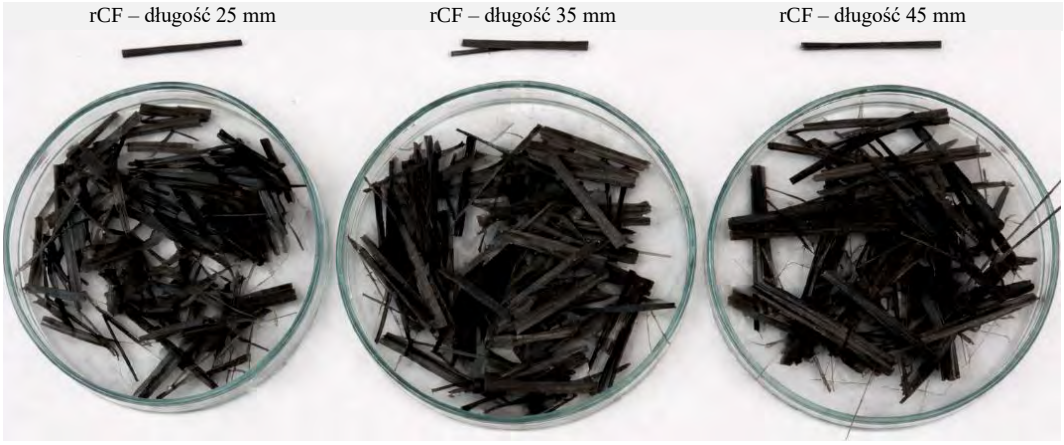
6 Zastosowanie odpadów jako zbrojenia rozproszonego w betonach

W rozdziale przedstawiono możliwości wykorzystania różnych rodzajów odpadów ścieru z gumy SBR, włókien węglowych z recyklingu łopat turbin wiatrowych jako alternatywy dla tradycyjnych włókien zbrojących. Omówiono również wpływ tego typu dodatków na właściwości świeżej i stwardniałej mieszanki.

6.1 Badania właściwości betonów z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w postaci włókien węglowych z recyklingu [P7]

W artykule [P7] przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dotyczących możliwości zastosowania w betonie zbrojenia rozproszonego z włókien węglowych rCF pochodzących z recyklingu łopat turbin wiatrowych. Program badań zakładał oznaczenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu dla trzech długości włókien 25mm, 35mm i 45 mm i trzech objętościowych zawartości włókien 0,29% (5,0 kg/m^3), 0,58% (10,0 kg/m^3) i 0,87% (15,0 kg/m^3), a także określenie wskaźnika kruchości i energii pękania. Wytrzymałość na rozciąganie określano dla dwóch kierunków obciążenia: równoległego i prostopadłego do kierunku betonowania.

W badaniach zastosowano włókno węglowe z recyklingu łopat turbin wiatrowych Włókna węglowe odzyskano metodą pirolizy według technologii firmy Anmet. Średnia gęstość uzyskanych włókien to 1,724 g/cm^3, a ich średnia wytrzymałość na rozciąganie wynosi 1650 MPa. Pasma włókien o szerokości 10 mm pocięto na długości 25 mm, 35 mm i 45 mm (Rys. 34). Cięcie włókien spowodowało ich defragmentację na węższe pasma.



Rys. 34. Zbrojenie rozproszone z włókien węglowych.
Fotografie własne. Opublikowane w artykule [P7].

Mieszanka betonowa zaprojektowana przy założeniu klasy wytrzymałości C35/45 zawierała cement portlandzki CEM I 42,5R z cementowni Górażdże i kruszywo naturalne o frakcjach 0/2 i 2/8 mm. W Tab. 11 zamieszczono skład wzorcowej mieszanki betonowej C-0 i mieszanek CF z różnymi dodatkami włókien węglowych z recyklingu (rCF). Stosunek wodnocementowy (w/c) wszystkich mieszanek wynosił 0,60.

Tab. 11. Skład mieszanki betonowej modyfikowanej różną zawartością włókien węglowych pochodzący z recyklingu łopat turbin wiatrowych.

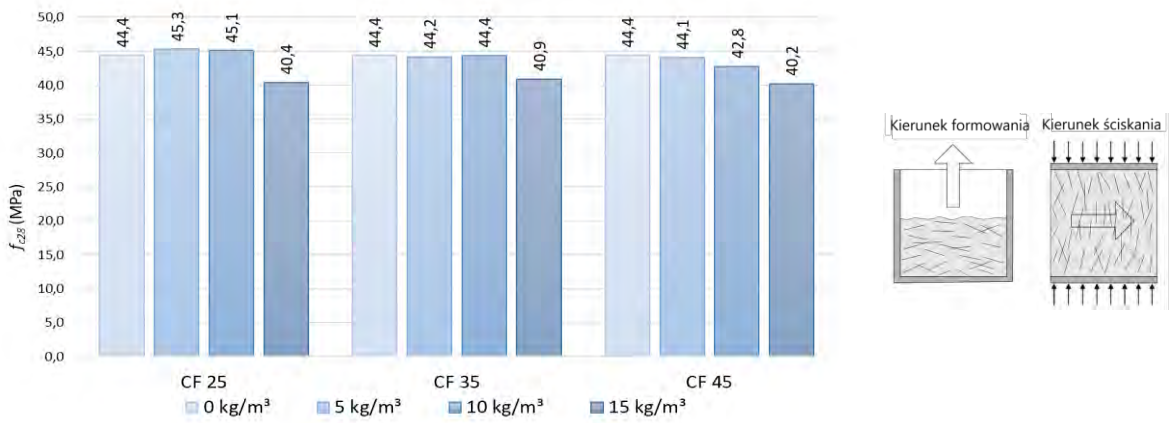
Symbol mieszanki	Skład mieszanki betonowej (kg/m^3)				
	Włókna węglowe	CEM I 42,5R	Woda	Piasek 0/2	Żwir 2/8
C-0	0	450	270	375	1500
CF-5	5				
CF-10	10				
CF-15	15				

Opracowanie własne. Założenia opublikowane w **[P7]**

Konsystencja. Konsystencja mieszanki betonowej zmienia się wraz ze wzrostem ilości dodatku. Niezależnie od długości włókien zmniejszenie urabialności mieszanki betonowej zmniejszała się wraz ze zwiększeniem ilości włókien. Mieszanka niezawierająca w swoim składzie włókien FC została zaklasyfikowana do klasy konsystencji S3 (opad stożka 140 mm), pozostałe mieszanki zaklasyfikowano do klasy S1. Opad stożka wynosił kolejno 30, 20 i 10 mm. Obserwowana zmiana konsystencji wynika z dużej wodożądności włókien węglowych. Zjawisko pogorszenia urabialności jest typowa dla tego rodzaju mieszanek z włóknami węglowymi.

Gęstość. Najwyższy spadek gęstości betonu zaobserwowano w przypadku zastosowania włókien węglowych o długości 45mm. Różnica gęstości względem próbki referencyjnej wyniosła maksymalnie 75 kg/m^3. W przypadku zastosowania modyfikacji włóknami o długości 35mm najwyższy spadek gęstości betonu wyniósł 57 kg/m^3 a w przypadku włókien o długości 25mm wyniósł maksymalnie 31 kg/m^3. Wyniki badań pozwoliły na analizę wpływu modyfikacji niektórych właściwości mechanicznych i fizycznych betonu z dodatkiem rCF w porównaniu do betonu referencyjnego, biorąc pod uwagę wpływ: orientacji, zawartości i długości rCF.

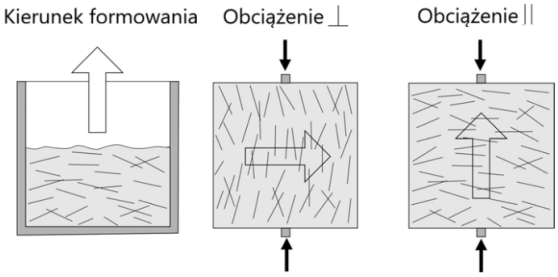
Wytrzymałości na ściskanie. Na Rys. 35 przedstawiono wpływ włókien na wytrzymałość na ściskanie betonów. Maksymalny spadek wytrzymałości na ściskanie wyniósł 9% i był oznaczony dla betonów zawierających włókna w ilości 5 i 15 kg/m^3 oraz długości włókien 25 i 35 mm. W przypadku włókien o długości 35mm spadek ten wyniósł 8%. W pozostałych przypadkach spadki wytrzymałości na ściskanie wyniosły maksymalnie 2%. W przypadku betonów modyfikowanych włóknami o długości 25 mm odnotowano nieznaczny dwu procentowy przyrost wytrzymałości na ściskanie w przypadku zastosowania dodatku w ilości 5 i 10 kg/m^3.



Rys. 35. Wytrzymałość na ściskanie betonów cementowych po 28 dniach dojrzewania modyfikowanych rożną zawartością włókien węglowych.

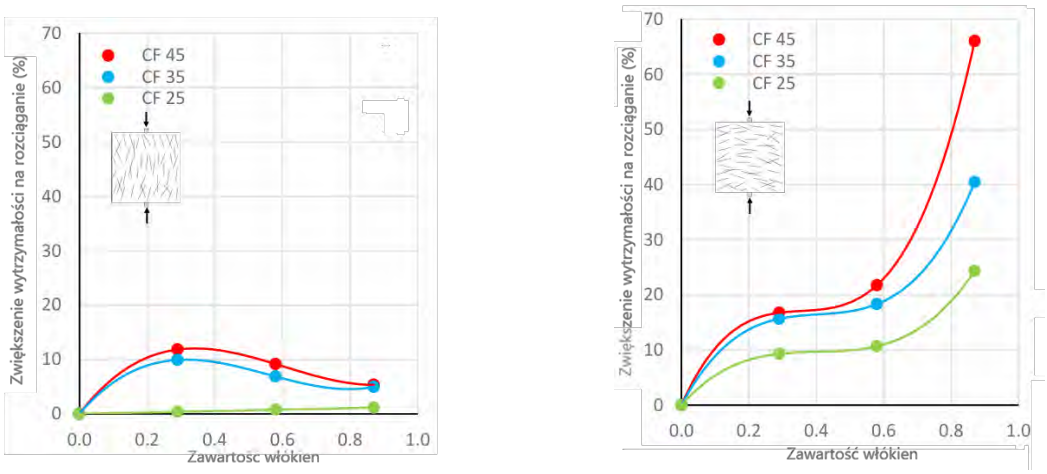
Badania opublikowane w **[P7]**.

Wytrzymałości na rozciąganie. Badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupaniu wykonywano prostopadle(⊥) i równolegle (‖) do kierunku betonowania. schemat obciążenia próbek przedstawiono na Rys. 36.Odnotowano wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu dla wszystkich próbek serii CF35 i CF45. Maksymalny wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu w obu seriach odnotowano dla dodatku na poziomie 5 kg/m3. Wzrost ten wyniósł odpowiednio 10 i 12%. Nie odnotowano wyraźnego przyrostu wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonów w betonach modyfikowanych włóknami o długości 25mm. Dla pełnej analizy przypadku oznaczono energie zniszczenia w celu zbadania odkształcalności doraźnej betonu. Energia zniszczenia została określona jako pole powierzchni pod krzywą zależności pomiędzy obciążeniem a przemieszczeniem podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. W przypadku wytrzymałości na rozciąganie prostopadle do kierunku betonowania największy wzrost wytrzymałości, od 5% do 12%, odnotowano dla próbek z włóknami o długości 45 mm. Podobną tendencję zaobserwowano również dla próbek CF-35 – wzrost wytrzymałości wahał się od 5% do 10%. W przypadku próbek CF-25 z włóknami o długości 25 mm, wytrzymałość wzrosła nie więcej niż 2%. Odnośnie wytrzymałości na rozciąganie w kierunku prostopadłym do kierunku betonowania w przypadku próbek CF-25 wartość ta wzrosła od 9% do 24%, w przypadku próbek rCF-35 do16% do 40%, a w przypadku próbek CF-45 od 17% do 66%,



Rys. 36. Schemat obciążenia próbek.
Opracowanie własne opublikowane w **[P7]**.

Należy zauważyć, że wyniki były istotnie zależne od trzech czynników: orientacji włókien, na którą wpływa kierunek betonowania, zawartości włókien oraz długości włókien. We wszystkich przypadkach wytrzymałość na rozciąganie rośnie wraz ze wzrostem długości włókien, przy czym efektywność włókien o długości 35 mm i 45 mm jest podobna, a nawet większa niż włókien o długości 25 mm. Wytrzymałość na rozciąganie próbek o długości włókien 35 mm i 45 mm jest znacznie wyższa niż próbek o długości włókien 25 mm. Wyniki badań zamieszczono na Rys. 37.



Rys. 37. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonów cementowych po 28 dniach dojrzewania modyfikowanych rożną zawartością włókien węglowych.
Badania opublikowane w **[P7]**.

Wskaźnikiem kruchości. Przy ocenie parametrów wytrzymałościowych materiałów kruchych istotny jest również wzajemny stosunek wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałość na ściskanie zwany wskaźnikiem kruchości materiału (BI). Analizując uzyskane dane, można stwierdzić, że beton referencyjny charakteryzował się większą kruchością, natomiast dodatek włókien zwiększył ciągliwość. Dla kierunku prostopadłego BI wzrasta maksymalnie o kilka procent dla najwyższej zawartości włókna 0,87%. Z drugiej strony, dla kierunku równoległego, przyrosty są znacznie większe i wahają się od 37% do 83% przy najwyższej zawartości włókna wynoszącej 0,87%.

Energia zniszczenia. Energia zniszczenia podczas rozciągania przy rozłupywaniu próbki referencyjnej bez włókien to 88 dżuli. Dodatek włókien rCF powoduje niewielki wzrost energii pękania prostopadle do kierunku betonowania, który zależy od ilości włókien i ich długości. Dla włókien o rCF 25 energia zniszczenia zwiększa się od 3% do 6% w porównaniu z próbkami bez włókien, dla włókien rCF 35 jest większa od 8% do 18%, a dla włókien rCF 45 jest większa od 22% do 24%. W próbkach badanych równolegle do kierunku betonowania energia zniszczenia wzrosła odpowiednio o 51,9%, 66,9% i 132,2% dla włókien o długościach 25, 35 i 45 mm. Ponadto poddano analizie wpływ dodatku rCF na właściwości mechaniczne CFRC obserwując powierzchni pęknięć próbek po ich rozszczepieniu (Rys. 38). Analizę przeprowadzono w celu określenia ilości i długości włókien, które pozostały na powierzchniach obu połówek próbek. Ponadto, scharakteryzowano ich zdolność do przenoszenia sił rozciągających, określając, czy uległy one pęknięciu, czy też zostały wyciągnięte z matrycy betonowej. Można zauważyć, że rozmieszczenie włókien na powierzchniach pęknięcia nie było równomierne. Dodatkowo widoczne były skupiska włókien. Stało się tak, ponieważ włókna węglowe nie były dokładnie wymieszane lub równomiernie rozłożone, tworząc jednorodną sieć włókien w próbce, głównie z powodu niskiej konsystencji mieszanki betonowej.



Rys. 38. Powierzchnia pęknięć próbek po ich rozszczepieniu.
Fotografia własna. Opublikowana w **[P7]**.

Podsumowanie: Badania dotyczące betonu zbrojonego włóknami węglowymi rCF z recyklingu łopat turbin wiatrowych wykazały, że dodatek włókien poprawia wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz zwiększa ciągliwość betonu, przy minimalnym wpływie na wytrzymałość na

ściskanie. Najbardziej efektywne okazały się włókna o długości 35–45 mm, a optymalna objętość wynosiła 5–10 kg/m³. Efektywność wzmocnienia zależała od orientacji włókien względem kierunku betonowania, długości i zawartości włókien. Dodatkowo włókna zwiększały energię pękania, zmniejszały kruchość materiału i poprawiały odkształcalność, choć lokalne skupiska włókien wynikały z ograniczonej urabialności mieszanki.

6.2 Badania właściwości betonów z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w postaci ścieru gumowego z recyklingu

Przeprowadzono ocenę możliwości zagospodarowania odpadów gumowych w postaci ścieru jako materiału wypełniającego objętość mieszanki betonowej. Badano ścier gumowy jako wypełniacz do betonu w ilościach 0, 10, 20 i 40% objętości mieszanki betonowej. Koncepcje składu poszczególnych mieszanek betonowych przedstawia Tab. 12.

Tab. 12. Projektowany skład betonu cementowego modyfikowanego ścierem z gumy SBR.

Nazwa materiału	Skład mieszanki betonowej z różną zawartością gumy (kg/m^3)			
	PM 1 (0% ścieru)	PM 6 (10% ścieru)	PM 7 (20% ścieru)	PM 8 (40% ścieru)
Domieszka uplastyczniająca	2,16	1,94	1,72	1,28
Woda	150	135	120	90
Cement CEM I 42,5R	270	243	216	162
Piasek 0/2mm	850	765	680	510
Kruszywo 2/8mm	500	450	400	300
Kruszywo 8/16mm	570	513	456	342
Popiół lotny	75	67	60	46
Guma SBR granulat	-	55	110	220

Opracowanie własne. Założenia niepublikowane.

Przyjęto 4 mieszanki betonowe z różną zawartością ścieru z gumy SBR (Rys. 39) w swoim składzie. Poddano ocenie parametry mieszanki betonowej: konsystencję, zawartość powietrza i gęstość. Wykonane betony poddano ocenie cech fizycznych i mechanicznych: wytrzymałość na ściskanie i zginanie, gęstość, nasiąkliwość, mrozoodporność, głębokość penetracji wody pod ciśnieniem, wskaźnik kruchości i przewodność cieplną.



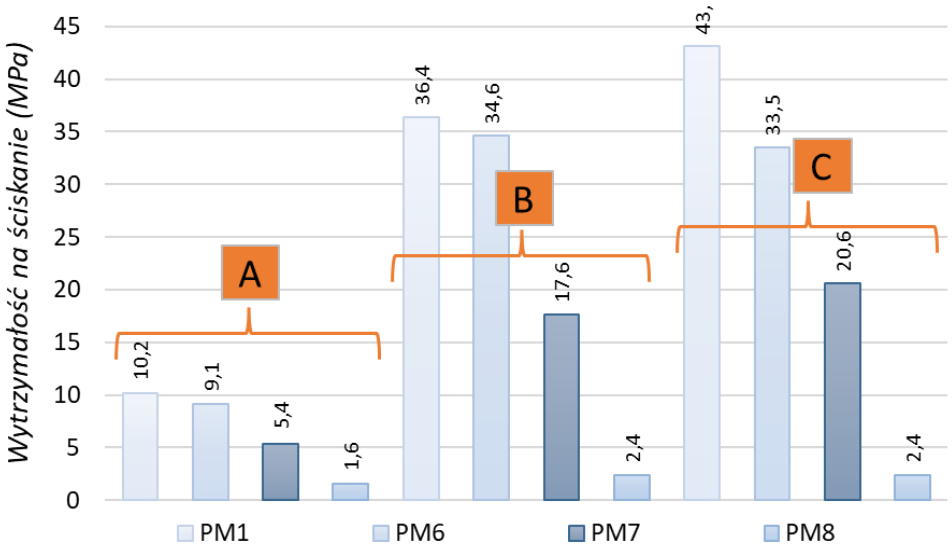
Rys. 39. Ścier z gumy SBR.
Fotografia własna.

Konsystencja. Konsystencja mieszanki betonowej zmienia się w sposób liniowy. Nastąpiło zmniejszenie urabialności mieszanki betonowej wraz ze wzrostem zawartości ścieru gumowego. Mieszanka nie zawierająca w swoim składzie ścieru gumowego została zaklasyfikowana do klasy konsystencji S2 (opad stożka 50 mm) pozostałe mieszanki zaklasyfikowano do klasy S1. Opad stożka wynosił kolejno 40, 30 i 10 mm.

Zawartość powietrza. Podczas oceny jakości wytworzonej mieszanki betonowej oznaczono zawartość powietrza we wszystkich mieszankach betonowych. Najwyższą oznaczoną zawartość powietrza odnotowano dla mieszanki zawierającej 10% ścieru a wynosiła ona 11,5%. W mieszance zawierającej 20% ścieru uzyskano wynik równy 6%. W przypadku badania zawartości powietrza w mieszance zawierającej 40 % ścieru z uwagi na zbyt dużo wolnych przestrzeni w strukturze mieszanki betonowej nie udało się wykonać oznaczenia zawartości powietrza.

Gęstość. Gęstość mieszanki betonowej zmieniała się wraz z ilością zastosowanego ścieru. Dla próbki referencyjnej gęstość wynosiła 2245 kg/m3. Maksymalny spadek gęstości mieszanki betonowej odnotowano w przypadku mieszanki zawierającej 20% ścieru gumowego (2111 kg/m^3). Nieoczekiwanie najmniejszy spadek gęstości mieszanki betonowej uzyskano w przypadku mieszanki zawierającej 40% ścieru gumowego gęstość ta była równa 2245 kg/m^3. Gęstość mieszanki betonowej zawierającej 10% ścieru wynosiła 2204 kg/m^3.

Wytrzymałości na ściskanie. Na Rys. 40 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonów zawierających ścier gumowy. Najwyższy spadek wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach dojrzewania oznaczono w przypadku betonów PM8 zawierających 40% ścieru, spadek ten wynosił 84%. Beton PM7 zawierający 20% ścieru wykazał spadek na poziomie 47%, a beton zawierający 10% ścieru na poziomie 11% wytrzymałości względem próbki niezawierającej ścieru gumowego. W przypadku betonów dojrzewających przez 28 dni odnotowano mniejszy spadek dla mieszanki zawierającej 10% a wyniósł on 5% względem próbki referencyjnej. Próbki zawierające 20% ścieru wykazały spadek wytrzymałości na poziomie 52%. W przypadku betonu zawierającego 40% ścieru w swoim składzie spadek ten wyniósł aż 93%. Podobne rezultaty spadku wytrzymałości wraz ze wzrostem zawartości ścieru odnotowano w przypadku wytrzymałości na ściskanie po 56 dniach dojrzewania betonów. Największy spadek wytrzymałości po 56 dniach dojrzewania odnotowano w przypadku betonu zawierającego 40% ścieru (ok. 94%). Próbki zawierające 20% ścieru wykazały spadek na poziomie 53% a próbki zawierające 10% ścieru wykazały spadek wytrzymałości na poziomie 22%.



Rys. 40. Wytrzymałość na ściskanie betonów cementowych po 7 [A], 28 [B] i 56 [C] dniach dojrzewania.

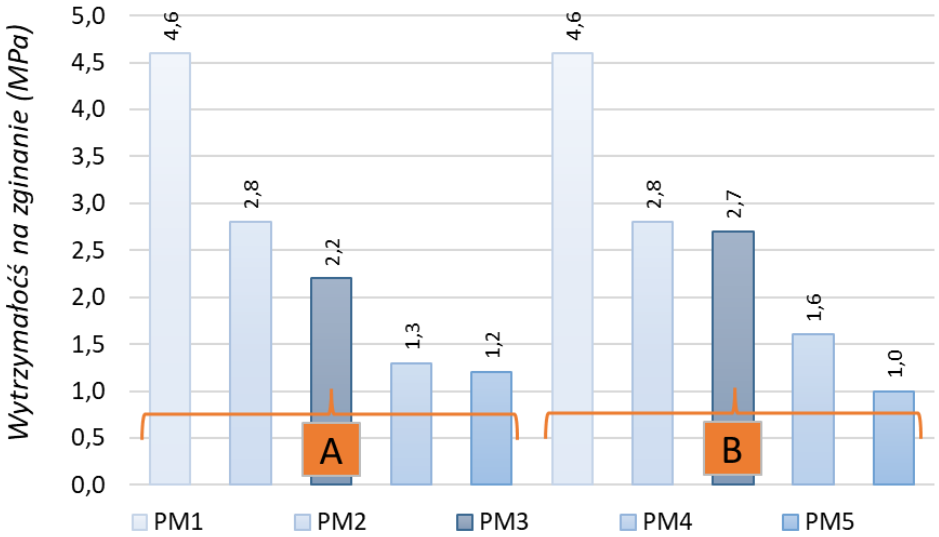
Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.

Nasiąkliwość. Próbki zawierające w swoim składzie 10 i 20% ścieru wykazały niższą nasiąkliwość względem próbki referencyjnej. W przypadku mieszanki serii zawierającej 10% ścieru nasiąkliwość wynosiła 4,9% co oznacza zmniejszenie nasiąkliwości betonu o 29% względem tej niezawierającej ścieru. W przypadku betonu zawierającego 20% ścieru gumowego odnotowano nasiąkliwość 6,5%. W przypadku mieszanki zawierającej 40% ścieru nastąpił wzrost nasiąkliwości o około 35% względem próbki referencyjnej.

Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem. Maksymalną głębokość penetracji wody pod ciśnieniem odnotowano dla próbki zawierającej 40% ścieru, wyniosła ona 140 mm. Najmniejszą penetrację wody odnotowano w przypadku betonu kontrolnego. W przypadku betonu zawierającego 10% ścieru głębokość wynosiła 55mm a w przypadku betonu z 20% ścieru 44mm.

Gęstość. Nie odnotowano znaczących zmian gęstości poszczególnych mieszanek betonowych w zależności od czasu dojrzewania tych mieszanek. Niezależnie od przyjętego czasu pielęgnacji próbek w wodzie (7, 28 czy 56 dni) tendencja spadku gęstości wraz ze zwiększeniem się ilości ścieru gumowego w poszczególnych seriach jest taka sama. Gęstość próbki referencyjnej wynosi około 2260 kg/m^3. Próbka zawierająca 10 % ścieru gumowego miała średnią gęstość około 2200 kg/m3, a ta zawierająca 20% ścieru około 2130 kg/m^3. Największy spadek gęstości wykazuje próbek zawierająca 40 % ścieru gumowego (około 1660 kg/m^3).

Wytrzymałość na zginanie. Dla betonów dojrzewających 28 i 56 dni oznaczono wytrzymałość na zginanie. Na Rys. 41 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na zginanie betonów. Najwyższy spadek wytrzymałości na zginanie wyniósł około 44% względem próbki referencyjnej, dotyczy on mieszanki z 40% dodatkiem gumy w składzie mieszanki betonowej. W przypadku betonu zawierającego 10% ścieru nie odnotowano spadku wytrzymałości na zginanie po 28 dniach, a różnica wytrzymałości względem próbki referencyjnej po 56 dniach dojrzewania wynosiła 0,3MPa. W przypadku dodatku gumy na poziomie 20% spadek wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania wyniósł około 20%. W przypadku wytrzymałości na zginanie po 56 dniach spadek wyniósł około 15%.



Rys. 41. Wytrzymałość na zginanie próbek betonowych modyfikowanych różną zawartością ścieru gumowego po 28 [A] dniach dojrzewania i 56 [B] dniach dojrzewania.
Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.

Mrozoodporność. Oceniono również wpływ rożnej zawartości ścieru gumowego na mrozoodporność betonów. Trzy próbki spośród wskazanych serii spełniły wymagania spadku wytrzymałości naściskanie po badaniu mrozoodporności. Była to próbka referencyjna i próbki zawierające 10 i 20 % ścieru. Spadki wytrzymałości w tych przypadkach wynosiły odpowiednio 17,4%, 11,1% i 8,8%. Próbki zawierające 10 i 20% ścieru w swoim składzie uzyskały wynik lepszy od próbki wzorcowej. Najwyższy spadek

odnotowano w przypadku betonu zawierającego 40% dodatku w postaci ścieru (26,3%). Na żadnej z badanych próbek nie odnotowano zniszczeń w postaci spękań.

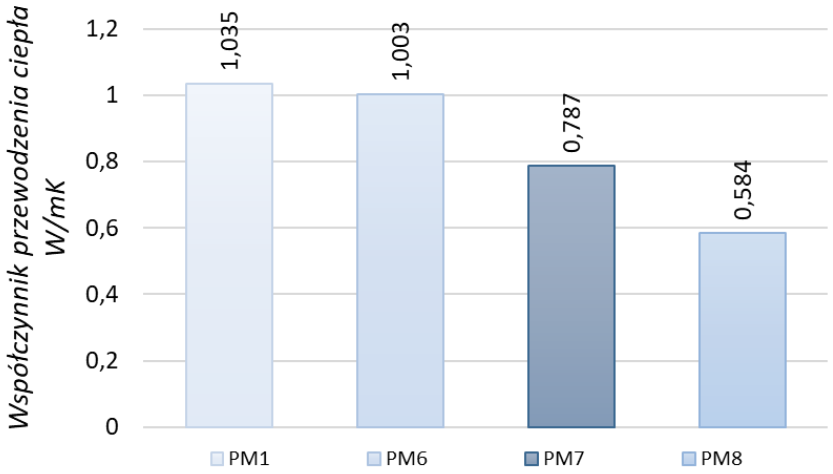
Wskaźnik kruchości. Dla betonów modyfikowanych ścierem gumowym oznaczono wskaźnik kruchości. Wyniki z przeprowadzonych badań wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na zginanie zaprezentowano w Tab. 13. W mieszankach zawierających 0 i 10% ścieru gumowego wartości wskaźnika kruchości betonu zawierają się w typowym zakresie dla betonu konstrukcyjnego (około 0,11–0,13), co wskazuje na klasyczne, kruche zachowanie materiału w momencie zniszczenia. W przypadku betonu zawierającego 20% ścieru wzrost wskaźnika do 0,21 sugeruje wyraźne zmniejszenie kruchości, beton ten wykazuje większą zdolność do przenoszenia odkształceń, co prowadzi do bardziej łagodnego przebiegu procesu zniszczenia. Dla 40% ścieru wartość wskaźnika kruchości (1,08) jest zaskakująco wysoka jak na beton cementowy. Wytrzymałość na ściskanie jest bardzo niska, a zachowanie bardziej przypomina materiał quasi-elastyczny lub silnie zmodyfikowany kompozyt. Uzyskane wyniki wskaźnika kruchości po 56 dniach dojrzewania betonu wykazały porównywalne wartości jak w przypadku betonu dojrzewającego 28 dni. Betony serii zawierających 0 i 10% ścieru gumowego wykazywały kruche zachowanie materiału w momencie zniszczenia. W przypadku 20% zawartości gumy wzrost wskaźnika wykazuje większą zdolność do przenoszenia odkształceń. Dla serii z 40% ścieru gumy wartość $f_{ct,56}/f_{ck,56}$ wynosi około 1,13. Wytrzymałość na zginanie okazała się większa od wytrzymałości na ściskanie, co jest efektem ułożenia ścieru gumowego prostopadle do kierunku działania siły zginającej.

Tab. 13. Wskaźnik kruchości betonu modyfikowanego różną zawartością ścieru gumowego po 28 i 56 dniach dojrzewania.

	PM 1 (0% Gumy)	PM 6 (10% ścieru)	PM 7 (20% ścieru)	PM 8 (40% ścieru)
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania (MPa)	36,3	34,6	17,6	2,4
Wytrzymałość na zginanie po 28 dniach dojrzewania (MPa)	4,6	4,6	3,7	2,6
Wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach dojrzewania (MPa)	43,1	33,5	20,6	2,4
Wytrzymałość na zginanie po 56 dniach dojrzewania (MPa)	4,6	4,3	3,9	2,7
Stosunek fct_{28} / fck_{28}	0,127	0,133	0,210	1,080
Stosunek fct_{56} / fck_{56}	0,107	0,128	0,189	1,125

Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.

Przewodność cieplna. Dla betonów modyfikowanych różną zawartością granulatu gumowego oznaczono współczynnik przewodzenia ciepła. Uzyskane wyniki współczynnika przewodności cieplnej zostały zaprezentowane na Rys. 42. Najwyższą przewodność cieplną oznaczono w przypadku betonu niezawierającego dodatku w postaci ścieru gumowego. Najwyższą izolacyjność termiczną wykazywały betony zawierające 40% dodatku ścieru gumowego w swoim składzie. Beton z 10% dodatkiem ścieru cechował się podobną przewodnością cieplną jak mieszanka niemodyfikowana dodatkiem ścieru gumowego. Betony zawierające 20% ścieru wykazywały również lepszą izolacyjność cieplną niż beton kontrolny niezawierający dodatku gumy.



Rys. 42. Współczynnik przewodności cieplnej dla betonu z różną zawartością ścieru gumowego po 28 dnach dojrzewania.

Opracowanie własne. Badania własne - niepublikowane.

Podsumowanie: Wprowadzenie gumy do mieszanki betonowej powodowało obniżenie urabialności, gęstości i wytrzymałości betonu, przy czym dodatki 10–20% pozwalały zachować właściwości konstrukcyjne, zmniejszały nasiąkliwość, mrozoodporność oraz izolacyjność cieplną. Wyższe udziały gumy (40%) prowadziły do znacznego spadku wytrzymałości i wzrostu wskaźnika kruchości, zmieniając charakter materiału w kierunku quasi-elastycznego. Wyniki wskazują, że umiarkowane stosowanie ścieru gumowego może stanowić praktyczne rozwiązanie dla lekkich i termicznie izolacyjnych betonów, natomiast nadmierne ilości istotnie ograniczają nośność i trwałość konstrukcji.

Badania przedstawione w niniejszym rozdziale nie były przedmiotem wcześniejszych publikacji naukowych i stanowią uzupełniający, autorski element rozprawy doktorskiej. Nie zostały one włączone do cyklu publikacji. Zamieszczenie wyników ma na celu rozszerzenie zakresu merytorycznego pracy oraz zapewnienie spójności i kompletności prowadzonych analiz badawczych.

PODSUMOWANIE

7 Wnioski

Wyniki badań w przedstawionej dysertacji dotyczą możliwości zastąpienia cementu odpadami o właściwościach pucolanowych, kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu oraz możliwych modyfikacji właściwości mechanicznych betonu przy użyciu odpadów spełniających funkcję zbrojenia rozproszonego. Możliwe jest kształtowanie właściwości mechanicznych i fizycznych betonów poprzez zastosowanie przetworzonych odpadów w postaci dodatków zastępujących częściowo cement lub kruszywo oraz pełniących funkcję zbrojenia rozproszonego. Zastosowane odpady mogą poprawić lub pogorszyć właściwości mechaniczne, a także właściwości fizyczne powstałych komponentów w zależności od ich zawartości. Zastąpienie komponentów betonu i modyfikacja właściwości betonu odpadami lub surowcami pochodzącymi z recyklingu odpadów może wpływać na jakość wytworzonych materiałów.

Głównym zadaniem postawionym w rozprawie była ocena możliwości zastosowania odpadów w trzech grupach badawczych:

1. Zastosowanie dodatków zastępujących częściowo cement (żużel pomiedziowy, mielone szkło, włókna szklane z recyklingu łopat turbin wiatrowych).
2. Modyfikacja składu ziarnowego zapraw i betonów (kruszywa pomiedziowe, guma SBR, stłuczka szklana).
3. Zastosowanie Zbrojenie rozproszone (włókna węglowe, ścier gumowy).

W celu rozpoznania właściwości kompozytów cementowych modyfikowanych odpadami w pracy zaprezentowano około 760 wyników badań. Łącznie przebadano około 2400 próbek. W Tab. 14 przedstawiono zestawienie uzyskanych wyników badań oraz ocenę wpływu poszczególnych odpadów na właściwości cementów.

Cement. W Tab. 14 przedstawiono zestawienie uzyskanych wyników badań oraz ocenę wpływu poszczególnych odpadów na właściwości cementów.

Tab. 14. Ocena wpływu zastosowania odpadów na właściwości cementów.

Wpływ zastosowania odpadów na właściwości cementu			
Badana cecha	Mielone szkło z recyklingu w betonie jako dodatek do cementu	Mielone szkło z recyklingu w betonie jako zamiennik popiołu lotnego	Mielony żużel pomiedziowy
Konsystencja	↑	↕	↓
Zawartość powietrza	↑	↑	–
Gęstość mieszanki	↕	–	–
Wytrzymałość na ściskanie	↓ $f_{c,7}$ ↔ $f_{c,28}$	↓ $f_{c,7}$ ↔ $f_{c,28}$	↑↑ $f_{c,2}$ ↑↑ $f_{c,28}$
Wytrzymałość na zginanie	–	–	↑↑ $f_{ct,2}$ ↑↑ $f_{ct,28}$
Gęstość po okresie dojrzewania	–	–	↑ $f_{c,2}$ ↑ $f_{c,28}$
Nasiąkliwość	↕	↑	↓↓
Mrozoodporność	↕ F25 ↕ F100	↑↑ F25 ↑↑ F100	–
Wskaźnik kruchości	–	–	–
↑ - wzrost; ↑↑ - silny wzrost; ↔ - brak wpływu; ↓ - spadek; ↓↓ - silny spadek; ↕ pozytywny lub negatywny wpływ zależny od ilości zastosowanego dodatku; „–” - parametru nie oznaczono			

Opracowanie własne.

Przedstawione wyniki badań obejmują trzy grupy dodatków odpadowych stosowanych w technologii cementu i betonu: mielone szkło z recyklingu jako dodatek do cementu, mielone szkło stosowane jako zamiennik popiołu lotnego oraz mielony żużel pomiedziowy. Analiza ich wpływu wskazuje na istotne zróżnicowanie oddziaływania na właściwości mieszanki oraz parametry mechaniczne i trwałościowe zapraw i betonów.

W zakresie właściwości reologicznych zaobserwowano, że mielone szkło stosowane jako dodatek do cementu prowadzi do poprawy konsystencji mieszanki, co można tłumaczyć efektem wypełnienia i korzystnym wpływem uziarnienia na strukturę kompozytu cementowego. W przypadku zastąpienia popiołu lotnego szkłem wpływ na konsystencję był zależny od ilości dodatku. Odmienny efekt odnotowano dla mielonego żużla pomiedziowego, który powodował pogorszenie urabialności, co może wynikać z jego większej powierzchni właściwej.

Zawartość powietrza wzrastała w mieszankach zawierających mielone szkło, zarówno jako dodatek do cementu, jak i zamiennik popiołu lotnego. Może to być efektem specyficznych właściwości powierzchniowych szkła oraz jego wpływu na strukturę porów w świeżej mieszance.

Analiza wytrzymałości na ściskanie wskazuje na zróżnicowany wpływ badanych dodatków. Zarówno szkło stosowane jako dodatek do cementu, jak i jako zamiennik popiołu lotnego powodowało spadek wytrzymałości we wczesnym okresie dojrzewania (7 dni), przy jednoczesnym braku istotnych zmian po 28 dniach. Zjawisko to można wiązać z wolniejszym przebiegiem reakcji pucolanowych w początkowej fazie hydratacji. W przeciwieństwie do tego, mielony żużel pomiedziowy wykazywał wyraźnie pozytywny wpływ na wytrzymałość na ściskanie, powodując jej znaczny wzrost zarówno we wczesnym, jak i późniejszym okresie dojrzewania. Wskazuje to na jego wysoką aktywność oraz korzystny wpływ na mikrostrukturę kompozytu cementowego.

Zastosowanie mielonego żużla pomiedziowego prowadziło do wzrostu wytrzymałości na zginanie, zarówno po 2, jak i 28 dniach dojrzewania. Oznacza to poprawę zdolności materiału do przenoszenia naprężeń rozciągających i wskazuje na korzystny wpływ tego dodatku na strukturę matrycy cementowej.

W zakresie właściwości fizycznych po okresie dojrzewania zauważono, że zastosowanie żużla pomiedziowego prowadzi do wzrostu gęstości materiału. Dla pozostałych dodatków nie stwierdzono istotnych zmian w tym zakresie.

Mielone szkło jako dodatek do cementu wykazuje działanie niejednoznaczne, zależne od jego ilości, natomiast jego zastosowanie jako zamiennika popiołu lotnego prowadzi do wzrostu nasiąkliwości, co może wskazywać na większą porowatość struktury. Mielony żużel pomiedziowy powoduje wyraźne obniżenie nasiąkliwości, co świadczy o poprawie szczelności kompozytu. W odniesieniu do mrozoodporności dodatek mielonego szkła wykazuje korzystny wpływ, szczególnie jako zamiennik popiołu lotnego, gdzie odnotowano znaczną poprawę odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie (dla F25 i F100).

Przeprowadzona analiza wskazuje, że najbardziej kompleksowo korzystny wpływ na właściwości mechaniczne i fizyczne wykazuje mielony żużel pomiedziowy, który poprawia zarówno wytrzymałość na ściskanie i zginanie, jak i szczelność materiału, przy jednoczesnym pogorszeniu właściwości reologicznych. Mielone szkło jako dodatek do cementu stanowi rozwiązanie o bardziej zrównoważonym charakterze, wpływając korzystnie na konsystencję i trwałość przy zachowaniu wytrzymałości na poziomie porównywalnym do mieszanki referencyjnej. Natomiast zastosowanie szkła jako zamiennika popiołu lotnego może być uznane za efektywną alternatywę w kontekście poprawy mrozoodporności, jednak wymaga optymalizacji ze względu na zwiększoną nasiąkliwość i opóźniony rozwój wytrzymałości.

Kruszywo. W Tab. 15 przedstawiono ocenę wpływu zastosowania odpadów na właściwości zapraw i betonów jako zamiennika kruszywa drobnego i grubego

Tab. 15. Ocena wpływu zastosowania odpadów jako substytutu kruszywa.

Wpływ zastosowania odpadów na właściwości zapraw i betonów jako zamiennika kruszywa drobnego i grubego							
Badana cecha	Mielone włókna szklane z recyklingu łopat turbin wiatrowych	Pył z gumy SBR jako dodatek do zapraw	Kruszywo pomiedziowe jako zamiennik kruszywa drobnego w zaprawach	Stłuczka szklana jako zamiennik kruszywa drobnego w zaprawach	Kruszywo pomiedziowe jako zamiennik kruszywa grubego w betonie	Granulatu z gumy SBR jako wypełniacz w betonie	Szkło z recyklingu jako zamiennik kruszywa grubego w betonie
Konsystencja	–	↓↓	↔	↓↓	↑↑	↕	↕
Zawartość powietrza	–	–	–	–	↑	↕	–
Gęstość mieszanki	–	–	–	–	↑	↓/↓↓	–
Wytrzmałośc na ściskanie	↓/↓↓ $f_{c,2}$ ↓/↓↓ $f_{c,28}$	↓↓ $f_{c,2}$ ↓↓ $f_{c,28}$	↓ $f_{c,2}$ ↕ $f_{c,28}$	↕ $f_{c,7}$ ↕ $f_{c,28}$	↕ $f_{c,7}$ ↕ $f_{c,28}$	↓↓ $f_{c,2}$ ↓↓ $f_{c,28}$ ↓↓ $f_{c,56}$	↓/↓↓ $f_{c,7}$ ↓/↓↓ $f_{c,28}$
Wytrzymałość na zginanie	↓/↓↓ $f_{ct,fl,2}$ ↓/↓↓ $f_{ct,fl,28}$	↓↓ $f_{ct,fl,2}$ ↓↓ $f_{ct,fl,28}$	↓ $f_{ct,fl,2}$ ↕ $f_{ct,fl,28}$	↕ $f_{ct,fl,2}$ ↕ $f_{ct,fl,28}$	–	↓↓ $f_{ct,fl,28}$ ↓↓ $f_{ct,fl,56}$	↑↑ $f_{ct,fl,28}$
Gęstość po okresie dojrzewania	↓↓	↓↓ $f_{c,2}$ ↓↓ $f_{c,28}$	↑↑ $f_{c,2}$ ↑↑ $f_{c,28}$	↓/↓↓ $f_{c,2}$ ↕ $f_{c,28}$	↑/↑↑ $f_{c,28}$	↓↓ $f_{c,2}$ ↓↓ $f_{c,28}$ ↓↓ $f_{c,56}$	↓/↓↓ $f_{c,2}$ ↓/↓↓ $f_{c,28}$
Nasiąkliwość	↑↑	↑	↓	↓/↓↓	↔	↕	↓
Mrozoodporność	–	–	–	–	↕ F150	↕	↕ F25
Głębokość penetracji	–	–	–	–	–	↑↑	–
Moduł Younga	–	–	–	–	–	↓↓	–
Przewodność cieplna	–	–	–	–	–	↑↑	–
Wskaźnik kruchości	↕	–	–	–	–	↑↑	–
Reraktywność alkaliczna	–	–	–	–	↓↓	–	↓↓
↑ - wzrost; ↑↑ - silny wzrost; ↔ - brak wpływu; ↓ - spadek; ↓↓ - silny spadek; ↕ - pozytywny lub negatywny wpływ zależny od ilości zastosowanego dodatku; „–”- parametru nie oznaczono							

Opracowanie własne.

Przeprowadzona analiza wykazała wyraźną zależność pomiędzy rodzajem zastosowanego odpadu a właściwościami zarówno mieszanki, jak i stwardniałego kompozytu cementowego. Kluczowe znaczenie ma tu rodzaj materiału, jego struktura powierzchniowa oraz zdolność do współpracy z zaczynem cementowym. W zakresie właściwości reologicznych mieszanki betonowej stwierdzono, że większość dodatków nie wpływa istotnie na zawartość powietrza, natomiast wyraźne zmiany obserwuje się w konsystencji mieszanek. Materiały o dużej zdolności do absorbcji wody takie jak mielone włókna szklane, prowadzą do pogorszenia urabialności, podczas gdy niektóre kruszywa odpadowe np. kruszywo pomiedziowe mogą wykazywać działanie stabilizujące lub nawet poprawiające konsystencję. Zastosowanie dodatków zwłaszcza pyłu i granulatu gumowego, skutkuje natomiast obniżeniem zagęszczalności mieszanki i pogorszeniem jej parametrów technologicznych.

Analiza gęstości mieszanek wskazuje na istotny wpływ rodzaju odpadu na gęstość. Materiały mineralne powodują jej wzrost lub pozostają neutralne, natomiast dodatki z odpadów gumowych, szczególnie granulat gumowy, prowadzą do znaczącego obniżenia gęstości. Wskazuje to na potencjalne zastosowanie tych materiałów w betonach lekkich, jednak kosztem właściwości mechanicznych.

Najbardziej istotne różnice odnotowano w zakresie wytrzymałości na ściskanie. Najkorzystniejszy wpływ wykazuje kruszywo pomiedziowe, szczególnie stosowane jako zamiennik kruszywa grubego, gdzie obserwuje się wyraźny wzrost wytrzymałości zarówno w krótkim, jak i długim okresie dojrzewania. Pozytywny, choć mniej intensywny efekt uzyskano również dla stłuczki szklanej stosowanej jako zamiennik kruszywa drobnego. Z kolei dodatki polimerowe, takie jak granulat gumowy oraz pył SBR, powodują istotne obniżenie wytrzymałości, co wynika z ich niskiej sztywności oraz słabej przyczepności do matrycy cementowej. Szczególnie niekorzystne efekty zaobserwowano również dla mielonych włókien pochodzących z recyklingu łopat turbin, które prowadzą do znacznego osłabienia struktury kompozytu.

Podobne zależności występują w przypadku wytrzymałości na zginanie, gdzie materiały mineralne mogą wykazywać efekt wzmacniający, natomiast dodatki z gumy działają destabilizująco. W dłuższym okresie dojrzewania przewaga materiałów mineralnych staje się jeszcze bardziej widoczna, co wskazuje na ich korzystny wpływ na rozwój mikrostruktury betonu.

W zakresie trwałości materiału obserwuje się, że odpady mineralne, szczególnie kruszywo pomiedziowe, poprawiają odporność na działanie mrozu oraz ograniczają negatywne efekty środowiskowe. Przeciwnie, mielone włókna szklane zwiększają nasiąkliwość i mogą pogarszać odporność na czynniki zewnętrzne. Jednocześnie materiały gumowe prowadzą do obniżenia modułu sprężystości, co może być korzystne w zastosowaniach wymagających zwiększonej odkształcalności lub zdolności tłumienia energii lub drgań.

Uzyskane wyniki wskazują, że odpady mineralne wykazują wysoki potencjał jako zamienniki kruszyw naturalnych i mogą być stosowane w betonach konstrukcyjnych bez pogorszenia ich właściwości, a często z ich poprawą. Z kolei odpady polimerowe, mimo negatywnego wpływu na wytrzymałość, mogą znaleźć zastosowanie w betonach specjalnych, gdzie kluczowe są właściwości funkcjonalne, takie jak niska gęstość, zwiększona odkształcalność czy zdolność absorpcji energii. Ostateczna ocena przydatności poszczególnych materiałów powinna uwzględniać kompromis pomiędzy wymaganiami mechanicznymi a funkcjonalnymi oraz docelowym zastosowaniem kompozytu.

Zbrojenie rozproszone. W Tab. 16 przedstawiono ocenę wpływu zastosowania odpadów jako zbrojenia rozproszonego w zaprawach i betonach.

Przeprowadzona analiza wpływu odpadów stosowanych jako zbrojenie rozproszone betonach wskazuje na wyraźne zróżnicowanie ich oddziaływania w zależności od charakteru materiału. Porównanie ścieru gumowego pochodzącego z recyklingu oraz włókien uzyskanych z recyklingu łopat turbin wiatrowych pokazuje, że kluczowe znaczenie mają właściwości mechaniczne dodatku, jego geometria oraz zdolność do współpracy z matrycą cementową.

Tab. 16. Ocena wpływu zastosowania odpadów jako zbrojenia rozproszonego w betonach.

Wpływ zastosowania odpadów jako zbrojenia rozproszonego w zaprawach i betonach		
Badana cecha	Ścier gumowy z recyklingu w betonie	Włókna węglowe z recyklingu łopat turbin wiatrowych w betonie
Konsystencja	↓	↓↓
Zawartość powietrza	↕	–
Gęstość mieszanki	↓/↔	–
Wytrzymałość na ściskanie	↓↓ $f_{c,2}$ ↓↓ $f_{c,28}$ ↓↓ $f_{c,56}$	↔/↓ $f_{c,28}$
Wytrzymałość na zginanie	↓/↓↓ $f_{ct,fl,2}$ ↓/↓↓ $f_{ct,fl,28}$ ↓/↓↓ $f_{ct,fl,56}$	↑↑ $f_{ct,fl,28}$
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu	–	↔ $f_{ct,sp,28(\parallel)}$ ↑↑ $f_{ct,sp,28(\perp)}$
Gęstość po okresie dojrzewania	↓/↓↓ $f_{c,2}$ ↓/↓↓ $f_{c,28}$ ↓/↓↓ $f_{c,56}$	↔
Nasiąkliwość	↕	–
Mrozoodporność	↕	–
Głębokość penetracji	↑/↑↑	–
Energia zniszczenia	–	↑↑
Wskaźnik kruchości	↑↑	↑↑
↑ - wzrost; ↑↑ - silny wzrost; ↔ - brak wpływu; ↓ - spadek; ↓↓ - silny spadek; ↕ - pozytywny lub negatywny wpływ zależny od ilości zastosowanego dodatku; „–” - parametru nie oznaczono		

Opracowanie własne.

W zakresie właściwości mieszanki oba analizowane materiały powodują pogorszenie konsystencji, przy czym efekt ten jest znacznie silniejszy w przypadku włókien węglowych. Wynika to z ich wydłużonego kształtu, oraz dużej wodożądności. Ścier gumowy wpływa dodatkowo na wzrost zawartości powietrza, co można tłumaczyć jego rozwiniętą powierzchnią sprzyjającą zatrzymywaniu pęcherzyków powietrza. Jednocześnie obserwuje się obniżenie gęstości mieszanki przy jego zastosowaniu, co związane jest z niską gęstością samego materiału. Włókna z turbin, stosowane w niewielkich ilościach objętościowych, nie wpływają istotnie na gęstość.

Najistotniejsze różnice ujawniają się w zakresie właściwości mechanicznych. W przypadku wytrzymałości na ściskanie ścier gumowy powoduje wyraźny spadek tego parametru w całym okresie dojrzewania. Jest to konsekwencją jego niskiej sztywności oraz słabej przyczepności do zaczynu cementowego, co prowadzi do powstawania stref osłabienia i koncentracji naprężeń. Włókna z recyklingu łopat turbin nie wykazują istotnego wpływu na wytrzymałość na ściskanie.

Zasadniczo odmienny obraz obserwuje się w przypadku wytrzymałości na zginanie, która stanowi kluczowy parametr dla materiałów zawierających zbrojenie rozproszone. Ścier gumowy powoduje jej spadek, co potwierdza brak zdolności tego materiału do efektywnego przenoszenia naprężeń rozciągających. Natomiast włókna z turbin wiatrowych wykazują wyraźny efekt wzmacniający, który zależy od kierunku ułożenia włókien. Wzrost wytrzymałości na rozciąganie prostopadle do kierunku betonowania jest niewielki w przeciwieństwie do wytrzymałości na rozciąganie równolegle do kierunku, której przyrost jest znaczny. Wynika to z mechanizmu mostkowania rys, w którym włókna przejmują naprężenia rozciągające i ograniczają propagację pęknięć. Efekt ten przekłada się również na istotny wzrost energii zniszczenia, co oznacza większą odporność materiału na kruche pękanie i bardziej plastyczny charakter zniszczenia.

Analiza właściwości trwałościowych wskazuje, że zastosowanie ścieru gumowego prowadzi do wzrostu nasiąkliwości oraz zwiększenia głębokości penetracji wody pod ciśnieniem, co świadczy

o pogorszeniu szczelności struktury. Jednocześnie obserwuje się poprawę mrozoodporności, co można wiązać z większą ilością porów powietrznych umożliwiających krystalizacji lodu podczas zamarzania wody. W przypadku włókien węglowych brak jednoznacznych zmian w większości parametrów trwałościowych sugeruje ich neutralny wpływ w tym zakresie.

W obu przypadkach odnotowano wzrost wskaźnika kruchości, jednak jego interpretacja jest różna. Dla ścieru gumowego oznacza to rzeczywiste pogorszenie właściwości mechanicznych i większą podatność na zniszczenie ale dający wyraźnie wyższy wskaźnik kruchości kompozytu. Natomiast w przypadku włókien węglowych wzrost ten może współwystępować z poprawą odporności na propagację rys, co wynika z bardziej złożonego mechanizmu zniszczenia materiału zbrojonego włóknami.

Przeprowadzona analiza jednoznacznie wskazuje, że skuteczność odpadów stosowanych jako zbrojenie rozproszone zależy przede wszystkim od ich właściwości mechanicznych i geometrii. Włókna z recyklingu łopat turbin wiatrowych wykazują wysoką przydatność w zastosowaniach konstrukcyjnych, poprawiając właściwości związane z pracą na zginanie oraz zwiększając odporność na zniszczenie. Z kolei ścier gumowy nie spełnia funkcji efektywnego zbrojenia i prowadzi do pogorszenia większości analizowanych parametrów, co ogranicza jego zastosowanie do materiałów o charakterze niekonstrukcyjnym lub specjalnym, gdzie istotne są inne cechy, takie jak obniżona gęstość czy zwiększona odporność na działanie mrozu.

Podsumowanie: Przeprowadzone analizy wykazały, że istnieje optymalny udział materiałów odpadowych w kompozytach cementowych, który pozwala zachować równowagę pomiędzy parametrami wytrzymałościowymi a korzyściami środowiskowymi. W wielu przypadkach wprowadzenie odpadów prowadziło do obniżenia wytrzymałości mechanicznej, ale jednocześnie powodowało poprawę innych właściwości użytkowych, takich jak szczelność, odporność na działanie czynników zewnętrznych oraz trwałość. Stwierdzono również, że zastosowanie mielonego szkła z recyklingu może skutecznie zastępować popiół lotny, a żużel pomiedziowy stanowi wartościowy zamiennik tradycyjnego kruszywa.

Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdziły słuszność przyjętej tezy badawczej. Właściwości kompozytów cementowych można efektywnie modyfikować odpadami, które przyczyniają się do poprawy właściwości materiałów, zmniejszenia śladu węglowego i ograniczenia eksploatacji zasobów naturalnych. Uzyskane wyniki potwierdziły, że właściwości kompozytów cementowych mogą być skutecznie modyfikowane przez zastosowanie odpadów zarówno w roli dodatków zastępujących cement, jak i substytutów kruszywa czy zbrojenia rozproszonego. Wszystkie założone cele badawcze zostały zweryfikowane. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszych badań nad projektowaniem i optymalizacją receptur betonów niskoemisyjnych oraz nad wdrażaniem materiałów z recyklingu do praktyki inżynierskiej.

Zastosowanie materiałów odpadowych jako zamienników surowców pierwotnych w kompozytach cementowych wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym. Ograniczenie udziału cementu, którego produkcja wiąże się z wysoką emisją dwutlenku węgla, prowadzi do obniżenia śladu węglowego betonu. Jednocześnie zmniejszenie zapotrzebowania na kruszywa naturalne ogranicza eksploatację złóż surowców mineralnych, co przekłada się na ograniczenie wpływu na środowisko naturalne poprzez powierzchni obszarów związanych z ich wydobyciem.

Wprowadzenie określonych rodzajów materiałów odpadowych do kompozytów cementowych może skutkować obniżeniem wybranych parametrów mechanicznych, zwłaszcza w początkowym okresie dojrzewania betonu. Jednocześnie jednak obserwuje się poprawę innych właściwości użytkowych, takich jak trwałość, odporność na cykle zamrażania i rozmrażania czy ograniczenie skurczu. Takie podejście pozwala na zwiększenie efektywności materiałowej kompozytów oraz

poprawę ich charakterystyki ekologicznej, szczególnie w przypadku betonów stosowanych w elementach niekonstrukcyjnych.

Potwierdzono, że przy racjonalnym doborze rodzaju i ilości odpadu możliwe jest uzyskanie betonów o właściwościach mechanicznych i użytkowych porównywalnych z betonem konwencjonalnym.

Warunkiem skutecznego wdrożenia tego typu rozwiązań jest jednak każdorazowe określenie optymalnej zawartości dodatku odpadowego, dostosowanej do wymagań technicznych i funkcjonalnych projektowanego kompozytu cementowego.

8 Propozycje przyszłych badań

W dalszych badaniach planowane jest rozszerzenie dotychczasowych analiz, aby pogłębić wiedzę na temat możliwości wykorzystania materiałów odpadowych w kompozytach cementowych oraz ich praktycznego zastosowania w budownictwie. Planuje się również przeprowadzenie badań długoterminowej trwałości analizowanych kompozytów, ze szczególnym uwzględnieniem ich odporności na agresję chemiczną, procesu karbonatyzacji oraz wpływu zmiennych warunków środowiskowych, a także określenie właściwości reologicznych.

Konieczna jest także szczegółowa analiza mikrostruktury kompozytów oraz mechanizmów oddziaływania między matrycą cementową a dodatkami pochodzącymi z odpadów.

Innym ważnym kierunkiem prac będzie określenie składu mieszanek z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych SSN. Planowane jest opracowanie modeli umożliwiających projektowanie składu betonów o określonych parametrach, którego komponentami są materiały pochodzące z recyklingu odpadów.

Potrzebne są próby skalowania opracowanych rozwiązań z poziomu laboratoryjnego do przemysłowego (wdrożeniowego). W tym zakresie przewiduje się opracowanie metod standaryzacji materiałów odpadowych, analizę powtarzalności ich właściwości oraz ocenę możliwości implementacji w istniejących procesach produkcyjnych. Uzupełnieniem planowanych badań będzie przeprowadzenie kompleksowej analizy środowiskowej i ekonomicznej, obejmującej ocenę cyklu życia (LCA) oraz analizę kosztów cyklu życia (LCCA). Pozwoli to na określenie rzeczywistych korzyści wynikających z zastosowania materiałów odpadowych w technologii betonu

Podsumowując, konieczna jest realizacja interdyscyplinarnego programu badawczego, który obejmie zagadnienia materiałowe, technologiczne oraz środowiskowe, co umożliwi pełniejsze wykorzystanie potencjału materiałów odpadowych w nowoczesnym budownictwie. Planowane jest również poszerzenie bazy materiałowej o dodatkowe rodzaje odpadów przemysłowych i komunalnych oraz opracowanie kompozycji hybrydowych, łączących różne typy dodatków. Działania te mają na celu identyfikację nowych rozwiązań materiałowych o korzystniejszych właściwościach mechanicznych, trwałościowych i środowiskowych.

WYKAZ LITERATURY

[1] Stowarzyszenie Producentów Cementu, „Wpływ branży cementowej na gospodarkę Polski”, 2024.

[2] Stowarzyszenia Polska Unia Ubocznych Produktów Spalania, „Dlaczego gospodarka o obiegu zamkniętym jest istotna”, Warszawa, 2016.

[3] A. Chajec i Ł. Sadowski, „Efekt środowiskowy wykorzystania odpadowej mączki granitowej w betonie w aspekcie jego dekarbonizacji i trwałości”, *Przegląd Budowlany*, t. 95, nr 6, s. 108–112, 2024, doi: 10.5604/01.3001.0054.7624.

[4] I. Haider *i in.*, „Investigating the synergistic effects of Metakaolin and silica fume on the strength and durability of recycled aggregate concrete at elevated temperatures”, *Sci. Rep.*, t. 15, nr 1, s. 29510, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-11494-w.

[5] M. Cyr, R. Idir, i G. Escadeillas, „Use of metakaolin to stabilize sewage sludge ash and municipal solid waste incineration fly ash in cement-based materials”, *J. Hazard. Mater.*, t. 243, s. 193–203, 2012, doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.019.

[6] S. D. Jesus *i in.*, „Waste of aluminum composite material applied to cement-based mortars and their chemical, microstructural, and mechanical properties”, *Next Materials*, t. 7, s. 100393, 2025, doi: 10.1016/j.nxmate.2024.100393.

[7] Państwowy Instytut Geologiczny, „Mineralne kruszywa naturalne”, Warszawa, 2019.

[8] M. Nieświec, P. Niewiadomski, Ł. Sadowski, i C. Schroefl, „Waste copper slag in special concrete: Current research and future applications”, *Mater. Des.*, t. 253, s. 113970, 2025, doi: 10.1016/j.matdes.2025.113970.

[9] Y. A. Al-Noaimat *i in.*, „Recycled brick aggregates in one-part alkali-activated materials: Impact on 3D printing performance and material properties”, *Developments in the Built Environment*, t. 16, s. 100248, 2023, doi: 10.1016/j.dibe.2023.100248.

[10] S. Rathnarajan i P. Sikora, „Seawater-mixed concretes containing natural and sea sand aggregates – A review”, *Results in Engineering*, t. 20, s. 101457, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101457.

[11] K. Federowicz *i in.*, „Development of 3D printed heavyweight concrete (3DPHWC) containing magnetite aggregate”, *Mater. Des.*, t. 233, s. 112246, 2023, doi: 10.1016/j.matdes.2023.112246.

[12] G. F. Peng, X. J. Niu, i Q. Q. Long, „Experimental Study of Strengthening and Toughening for Recycled Steel Fiber Reinforced Ultra-High Performance Concrete”, *Key Eng. Mater.*, t. 629–630, s. 104–111, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.104.

[13] M. Pająk i G. Wandzik, „Laboratory Tests of Concrete Beams Reinforced with Recycled Steel Fibres and Steel Bars”, *Materials*, t. 14, nr 22, s. 6752, 2021, doi: 10.3390/ma14226752.

[14] M. Małek, M. Jackowski, W. Łasica, i M. Kadela, „Characteristics of Recycled Polypropylene Fibers as an Addition to Concrete Fabrication Based on Portland Cement”, *Materials*, t. 13, nr 8, s. 1827, 2020, doi: 10.3390/ma13081827.

[15] S.-J. Lee, H. Shin, H.-N. Lee, S.-H. Park, H.-M. Kim, i C.-G. Park, „Effect of Waste PET Fiber on the Mechanical Properties and Chloride Ion Penetration of Emergency Repair

Concrete for Road Pavement", *Materials*, t. 17, nr 21, s. 5352, 2024, doi: 10.3390/ma17215352.

[16] R. M. Gonçalves, A. Martinho, i J. P. Oliveira, „Recycling of Reinforced Glass Fibers Waste: Current Status", *Materials*, t. 15, nr 4, s. 1596, 2022, doi: 10.3390/ma15041596.

[17] M. Małek, M. Jackowski, W. Łasica, M. Kadela, i M. Wachowski, „Mechanical and Material Properties of Mortar Reinforced with Glass Fiber: An Experimental Study", *Materials*, t. 14, nr 3, s. 698, 2021, doi: 10.3390/ma14030698.

[18] Ł. Drobiec i J. Blazy, „Współczesne niemetaliczne zbrojenia rozproszone stosowane w konstrukcjach betonowych", *Izolacje* , t. 5, 2020.

[19] J. Blazy, Ł. Drobiec, i P. Wolka, „Flexural Tensile Strength of Concrete with Synthetic Fibers", *Materials*, t. 14, nr 16, s. 4428, 2021, doi: 10.3390/ma14164428.

[20] M. Ozawa, S. Subedi Parajuli, Y. Uchida, i B. Zhou, „Preventive effects of polypropylene and jute fibers on spalling of UHPC at high temperatures in combination with waste porous ceramic fine aggregate as an internal curing material", *Constr. Build. Mater.*, t. 206, s. 219–225, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.056.

[21] J. A. Abdalla *i in.*, „A comprehensive review on the use of natural fibers in cement/geopolymer concrete: A step towards sustainability", *Case Studies in Construction Materials*, t. 19, s. e02244, 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02244.

[22] J. A. Abdalla, B. S. Thomas, i R. A. Hawileh, „Use of hemp, kenaf and bamboo natural fiber in cement-based concrete", *Mater. Today Proc.*, t. 65, s. 2070–2072, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.06.428.

[23] Polski Komitet Normalizacji, „PN-S-96014: Drogi samochodowe i lotniskowe. Podbudowy z betonu cementowego po nawierzchnię ulepszoną. Wymagania i badania", 1997.

[24] Polski Komitet Normalizacji, „PN-88/B-06250: Beton zwykły", 1988.

WYKAZ TABEL

Tab. 1. Wkład autora w przygotowanie poszczególnych publikacji. 8

Tab. 2. Skład zapraw cementowych modyfikowanych drobnym kruszywem pomiedziowym. 30

Tab. 3. Skład zapraw cementowych modyfikowanych drobnym kruszywem ze stłuczki szklanej z recyklingu szklanych butelek. 33

Tab. 4. Wyniki badań właściwości kruszyw. 36

Tab. 5. Ocena reaktywności alkalicznej żużla pomiedziowego. 37

Tab. 6. Ocena reaktywności alkalicznej kruszywa granitowego z kopalni granitu Rogoźnica II. 37

Tab. 7. Wytrzymałość na ściskanie betonu z różną zawartością kruszywa pomiedziowego po 3000. dniach dojrzewania (8 lat i 78 dni). 38

Tab. 8. Projektowany skład betonu cementowego modyfikowanego gumą SBR. 39

Tab. 9. Wskaźnik kruchość betonu modyfikowanego gumą SBR po 28 dniach dojrzewania. 42

Tab. 10. Procentowa zawartość kruszyw zastosowana do produkcji mieszanek betonowych. 44

Tab. 11. Skład mieszanki betonowej modyfikowanej różną zawartością włókien węglowych pochodzący z recyklingu łopat turbin wiatrowych. 48

Tab. 12. Projektowany skład betonu cementowego modyfikowanego ścierem z gumy SBR. 51

Tab. 13. Wskaźnik kruchości betonu modyfikowanego różną zawartością ścieru gumowego po 28 i 56 dniach dojrzewania. 54

Tab. 14. Ocena wpływu zastosowania odpadów na właściwości cementów. 56

Tab. 15. Ocena wpływu zastosowania odpadów jako substytutu kruszywa. 58

Tab. 16. Ocena wpływu zastosowania odpadów jako zbrojenia rozproszonego w betonach. 60

WYKAZ RYSUNKÓW

Rys. 1. Produkcja cementu w Polsce. 12

Rys. 2. Produkcja kruszyw mineralnych w Polsce od roku 1989. 13

Rys. 3. Właściwości mechaniczne wybranych włókien stosowanych w betonach cementowych. 15

Rys. 4. Mielone szkło z recyklingu opakowań szklanych. 17

Rys. 5. Zależność wytrzymałości na ściskanie od ilości mielonego szkła i stosunku W/C. 18

Rys. 6. Popiół lotny krzemionkowy. 19

Rys. 7. Mielone szkło z recyklingu opakowań szklanych. 19

Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie próbek betonu po 7 i 28 dniach dojrzewania. 20

Rys. 9. Mielony żużel pomiedziowy. 21

Rys. 10. Wytrzymałość na zginanie zapraw cementowych z mielonym żużlem pomiedziowym. 22

Rys. 11. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych z mielonym żużlem pomiedziowym. 23

Rys. 12. Pyły pozyskane z instalacji odpylania podczas recyklingu mechanicznego łopat turbin wiatrowych. 24

Rys. 13. Wpływ dodatku proszków WPM i PPM na 2 i 28 dniową wytrzymałość na zginanie zapraw. 25

Rys. 14. Wpływ dodatku proszków WPM i PPM na 2 i 28 dniową wytrzymałość na ściskanie zapraw. 26

Rys. 15. Pył z gumy SBR. 27

Rys. 16. Wytrzymałość na zginanie zapraw cementowych. 27

Rys. 17. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych modyfikowanych miałem gumowym. 28

Rys. 18. Kruszywo z żużla pomiedziowego 0-2 mm. 29

Rys. 19. Wytrzymałość na zginanie zapraw cementowych modyfikowanych kruszywem z żużla pomiedziowego o frakcji 0-2 mm. 30

Rys. 20. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych modyfikowanych kruszywem z żużla pomiedziowego frakcji 0-2 mm. 31

Rys. 21. Próbki po badaniu wytrzymałości na ściskanie zapraw modyfikowanych drobnym kruszywem z żużla pomiedziowego. 31

Rys. 22. Stłuczka szklana 0-2 mm. 32

Rys. 23. Wytrzymałość na zginanie zapraw cementowych modyfikowanych kruszywem ze stłuczki szklanej z recyklingu. 34

Rys. 24. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych modyfikowanych kruszywem ze stłuczki szklanej z recyklingu. 34

Rys. 25. Próbki po badaniu wytrzymałości na ściskanie zapraw modyfikowanych drobnym kruszywem ze stłuczki szklanej. 35

Rys. 26. Kruszywo z żużla pomiedziowego. 36

Rys. 27. Wytrzymałość na ściskanie betonów cementowych po 7 i 28 dniach dojrzewania. 38

Rys. 28. Granulat gumowy SBR. 40

Rys. 29. Wytrzymałość na ściskanie betonów cementowych po 7 [A], 28 [B] i 56 [C] dniach dojrzewania modyfikowanych różną zawartością granulatu gumowego. 41

Rys. 30. Wytrzymałość na zginanie próbek betonowych modyfikowanych różną zawartością granulatu gumowego po 28 [A] i 56 [B] dniach dojrzewania. 41

Rys. 31. Współczynnik przewodności cieplnej dla betonu z różną zawartością granulatu gumowego po 28 dnach dojrzewania. 43

Rys. 32. Szkło z recyklingu. 44

Rys. 33. Wytrzymałość na ściskanie po 7 i 28 dniach dojrzewania modyfikowanych różną zawartością szkła z recyklingu. 45

Rys. 34. Zbrojenie rozproszone z włókien węglowych. 47

Rys. 35. Wytrzymałość na ściskanie betonów cementowych po 28 dniach dojrzewania modyfikowanych rożną zawartością włókien węglowych. 48

Rys. 36. Schemat obciążenia próbek. 49

Rys. 37. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonów cementowych po 28 dniach dojrzewania modyfikowanych rożną zawartością włókien węglowych. 49

Rys. 38. Powierzchnia pęknięć próbek po ich rozszczepieniu. 50

Rys. 39. Ścier z gumy SBR. 51

Rys. 40. Wytrzymałość na ściskanie betonów cementowych po 7 [A], 28 [B] i 56 [C] dniach dojrzewania. 52

Rys. 41. Wytrzymałość na zginanie próbek betonowych modyfikowanych różną zawartością ścieru gumowego po 28 [A] dniach dojrzewania i 56 [B] dniach dojrzewania. 53

Rys. 42. Współczynnik przewodności cieplnej dla betonu z różną zawartością ścieru gumowego po 28 dnach dojrzewania. 55

ZAŁĄCZNIKI

Oświadczenia współautorów o wkładzie w przygotowane publikacje.

Artykuł **[P1]**.

Artykuł **[P2]**.

Artykuł **[P3]**.

Artykuł **[P4]**.

Artykuł **[P5]**.

Artykuł **[P6]**.

Artykuł **[P7]**.

Artykuł **[P8]**.

Załącznik nr 3a do Regulaminu
postępowania w sprawie nadania stopnia doktora na Uniwersytecie Zielonogórskim

Zielona Góra, 27.04.2026 r.

mgr inż. Filip Szmatuła
Instytut Budownictwa
Uniwersytet Zielonogórski
ul. prof. Z. Szafrana 1, 65-516 Zielona Góra
e-mail: f.szmatula@ib.uz.zgora.pl

Przewodnicząca
Rady Dyscypliny Naukowej
Inżynieria lądowa, geodezja i transport
dr hab. inż. Beata Nowogońska, prof. UZ

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że jestem współautorem publikacji zatytułowanej *" Wpływ dodatku miału gumowego SBR na właściwości zapraw cementowych"*, która ukazała się w czasopiśmie *Materiały Budowlane* (*rok publikacji 2020, nr. 12, strony 12-15*). Wkład poszczególnych autorów w przygotowanie tej publikacji przedstawia się następująco:

Autor	Udział procentowy [%]	Podpis
dr hab. inż. Jacek Korentz prof. UZ	40	
mgr inż. Filip Szmatuła	60	

Swój całkowity wkład w przygotowanie publikacji oceniam na **60 procent**.

.....

Załącznik nr 3a do Regulaminu
postępowania w sprawie nadania stopnia doktora na Uniwersytecie Zielonogórskim

Zielona Góra, 27.04.2026 r.

mgr inż. Filip Szmatuła
Instytut Budownictwa
Uniwersytet Zielonogórski
ul. prof. Z. Szafrana 1, 65-516 Zielona Góra
e-mail: f.szmatula@ib.uz.zgora.pl

Przewodnicząca
Rady Dyscypliny Naukowej
Inżynieria lądowa, geodezja i transport
dr hab. inż. Beata Nowogońska, prof. UZ

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że jestem współautorem publikacji zatytułowanej *"Właściwości betonu z dodatkiem kruszywa z żużla pomiedziowego = Properties of concrete with the addition of copper slag aggregate"*, która ukazała się w czasopiśmie *Cement, Wapno, Beton* (*rok publikacji 2020, Vo. 25, no. 5, 367--375*). Wkład poszczególnych autorów w przygotowanie tej publikacji przedstawia się następująco:

Autor	Udział procentowy [%]	Podpis
dr hab. inż. Jacek Korentz prof. UZ	10	
dr inż. Robert Jurczak	35	
mgr inż. Filip Szmatuła	55	

Swój całkowity wkład w przygotowanie publikacji oceniam na **55 procent**.

Filip Szmatuła

Załącznik nr 3a do Regulaminu
postępowania w sprawie nadania stopnia doktora na Uniwersytecie Zielonogórskim

Zielona Góra, 27.04.2026 r.

mgr inż. Filip Szmatuła
Instytut Budownictwa
Uniwersytet Zielonogórski
ul. prof. Z. Szafrana 1, 65-516 Zielona Góra
e-mail: f.szmatula@ib.uz.zgora.pl

Przewodnicząca
Rady Dyscypliny Naukowej
Inżynieria lądowa, geodezja i transport
dr hab. inż. Beata Nowogońska, prof. UZ

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że jestem współautorem publikacji zatytułowanej *"Wpływ mielonego szkła z recyklingu na wytrzymałość i trwałość betonów o niskiej klasie wytrzymałości"*, która ukazała się w czasopiśmie *Materiały Budowlane* (*rok publikacji 2021, nr 11, strony 41-46*). Wkład poszczególnych autorów w przygotowanie tej publikacji przedstawia się następująco:

Autor	Udział procentowy [%]	Podpis
dr hab. inż. Jacek Korentz prof. UZ	10	
dr inż. Robert Jurczak	30	
dr inż. Tomasz Rudnicki	20	
mgr inż. Filip Szmatuła	40	

Swój całkowity wkład w przygotowanie publikacji oceniam na **40 procent**.

Filip Szmatuła

Załącznik nr 3a do Regulaminu
postępowania w sprawie nadania stopnia doktora na Uniwersytecie Zielonogórskim

Zielona Góra, 27.09.2016 r.

mgr inż. Filip Szmatuła
Instytut Budownictwa
Uniwersytet Zielonogórski
ul. prof. Z. Szafrana 1, 65-516 Zielona Góra
e-mail: f.szmatula@ib.uz.zgora.pl

Przewodnicząca
Rady Dyscypliny Naukowej
Inżynieria lądowa, geodezja i transport
dr hab. inż. Beata Nowogońska, prof. UZ

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że jestem współautorem publikacji zatytułowanej *"Evaluation of the Possibility of Replacing Fly Ash with Glass Powder in Lower-Strength Concrete Mixes"*, która ukazała się w czasopiśmie *Applied Sciences (Switzerland)* (*rok publikacji 2021, Vol. 11, iss. 1, art. 396, 1--10*). Wkład poszczególnych autorów w przygotowanie tej publikacji przedstawia się następująco:

Autor	Udział procentowy [%]	Podpis
dr inż. Robert Jurczak	50	
mgr inż. Filip Szmatuła	50	

Swój całkowity wkład w przygotowanie publikacji oceniam na **50 procent**.

Załącznik nr 3a do Regulaminu
postępowania w sprawie nadania stopnia doktora na Uniwersytecie Zielonogórskim

Zielona Góra, 27.04.2026 r.

mgr inż. Filip Szmatuła
Instytut Budownictwa
Uniwersytet Zielonogórski
ul. prof. Z. Szafrana 1, 65-516 Zielona Góra
e-mail: f.szmatula@ib.uz.zgora.pl

Przewodnicząca
Rady Dyscypliny Naukowej
Inżynieria lądowa, geodezja i transport
dr hab. inż. Beata Nowogońska, prof. UZ

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że jestem współautorem publikacji zatytułowanej *"Effect of Ground Waste Glass Addition on the Strength and Durability of Low Strength Concrete Mixes"*, która ukazała się w czasopiśmie *Materials* (*rok publikacji 2021, Vol. 14, iss. 1, 1--15*). Wkład poszczególnych autorów w przygotowanie tej publikacji przedstawia się następująco:

Autor	Udział procentowy [%]	Podpis
dr hab. inż. Jacek Korentz prof. UZ	10	
dr inż. Robert Jurczak	30	
dr inż. Tomasz Rudnicki	20	
mgr inż. Filip Szmatuła	40	

Swój całkowity wkład w przygotowanie publikacji oceniam na **40 procent**.

Filip Szmatuła

Załącznik nr 3a do Regulaminu
postępowania w sprawie nadania stopnia doktora na Uniwersytecie Zielonogórskim

Zielona Góra, 27.04.2026 r.

mgr inż. Filip Szmatuła
Instytut Budownictwa
Uniwersytet Zielonogórski
ul. prof. Z. Szafrana 1, 65-516 Zielona Góra
e-mail: f.szmatula@ib.uz.zgora.pl

Przewodnicząca
Rady Dyscypliny Naukowej
Inżynieria lądowa, geodezja i transport
dr hab. inż. Beata Nowogońska, prof. UZ

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że jestem współautorem publikacji zatytułowanej *„Właściwości zapraw cementowych z dodatkiem rozdrobnionego GFRP z recyklingu łopat turbin wiatrowych"*, która ukazała się w czasopiśmie *Materiały Budowlane* (*rok publikacji 2023, nr. 11, strony 32-35*). Wkład poszczególnych autorów w przygotowanie tej publikacji przedstawia się następująco:

Autor	Udział procentowy [%]	Podpis
dr hab. inż. Jacek Korentz prof. UZ	30	
mgr inż. Filip Szmatuła	70	

Swój całkowity wkład w przygotowanie publikacji oceniam na **70 procent**.

Filip Szmatuła

Załącznik nr 3a do Regulaminu
postępowania w sprawie nadania stopnia doktora na Uniwersytecie Zielonogórskim

Zielona Góra, 27.04.2026 r.

mgr inż. Filip Szmatuła
Instytut Budownictwa
Uniwersytet Zielonogórski
ul. prof. Z. Szafrana 1, 65-516 Zielona Góra
e-mail: f.szmatula@ib.uz.zgora.pl

Przewodnicząca
Rady Dyscypliny Naukowej
Inżynieria lądowa, geodezja i transport
dr hab. inż. Beata Nowogońska, prof. UZ

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że jestem współautorem publikacji zatytułowanej *"Properties of FRC with Carbon Fibres from Recycled Wind Turbine Blades"*, która ukazała się w czasopiśmie *Polymers* (*rok publikacji 2025, Vol. 17, iss. 23, art. 3199, 1--19*). Wkład poszczególnych autorów w przygotowanie tej publikacji przedstawia się następująco:

Autor	Udział procentowy [%]	Podpis
dr hab. inż. Jacek Korentz prof. UZ	40	
mgr inż. Filip Szmatuła	60	

Swój całkowity wkład w przygotowanie publikacji oceniam na **60 procent**.

Filip Szmatuła

Załącznik nr 3a do Regulaminu
postępowania w sprawie nadania stopnia doktora na Uniwersytecie Zielonogórskim

Zielona Góra, 27.01.2026 r.

mgr inż. Filip Szmatuła
Instytut Budownictwa
Uniwersytet Zielonogórski
ul. prof. Z. Szafrana 1, 65-516 Zielona Góra
e-mail: f.szmatula@ib.uz.zgora.pl

Przewodnicząca
Rady Dyscypliny Naukowej
Inżynieria lądowa, geodezja i transport
dr hab. inż. Beata Nowogońska, prof. UZ

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że jestem autorem publikacji zatytułowanej *"Assessment of the impact of SBR rubber waste on selected properties of cement concrete = Ocena wpływu odpadów gumowych SBR na wybrane właściwości betonu cementowego"*, która ukazała się w czasopiśmie *Materiały Budowlane* (*rok publikacji 2025, Vol. 640, iss. 12, p. 1--7*).

Całkowity wkład w przygotowanie publikacji wynosi **100 procent**.

Filip Szmatuła

dr hab. inż. Jacek Korentz, prof. UZ[1)*)]
ORCID: 0000-0002-1521-8681
mgr inż. Filip Szmatuła[2)]
ORCID: 0000-0001-9725-1540

Wpływ dodatku miału gumowego SBR na właściwości zapraw cementowych

Effect of the addition of rubber dust SBR on the properties of cement mortars

DOI: 10.15199/33.2020.12.

Streszczenie. Zagospodarowanie odpadów gumowych ma duże znaczenie dla ochrony środowiska. Ważny jest też aspekt ekonomiczny. W wyniku recyklingu materiałowego odpadów gumowych otrzymuje się granulat o różnych frakcjach, który jest z powodzeniem stosowany np. w budownictwie drogowym do modyfikacji asfaltów. Prowadzone są także badania zastosowania granulatów gumowych do produkcji betonu cementowego. W artykule przedstawiono wyniki badań zapraw cementowych z dodatkiem miału gumowego SBR z recyklingu odpadów gumowych pochodzących ze sprzętów AGD, uszczelek samochodowych i taśmociągów przemysłowych. Zastosowanie miału gumowego w zaprawach cementowych powoduje zmniejszenie ich wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie oraz gęstości pozornej i zwiększenie nasiąkliwości ze wzrostem ilości miału gumowego. Wzrost ilości gumy sprawia, że zaprawa staje się materiałem mniej kruchym, ponieważ rośnie relacja między wytrzymałością na rozciąganie i wytrzymałością na ściskanie.
Słowa kluczowe: granulat gumowy; beton; wytrzymałość; nasiąkliwość; gęstość.

Abstract. The management of rubber waste is of great importance for environmental protection, the economic aspect is important. The material recycling of rubber waste results in granulate with different fractions. It is successfully used e.g. in road construction to modify asphalt. Research is also being conducted into the use of rubber granules for the production of cement concrete. The article presents the results of tests of cement mortars with the addition of SBR rubber dust from recycled rubber waste from household appliances, car seals and industrial belt conveyors. The application of rubber dust in cement mortars causes a decrease in their compressive and tensile strength, a decrease in apparent density and an increase in absorbability with an increase in the amount of rubber dust. The increase in the amount of rubber makes the mortar less brittle as the relation between tensile strength and compressive strength increases.
Keywords: rubber granulate; concrete; strength; absorbability; density.

W Polsce, podobnie jak w innych krajach Unii Europejskiej, ok. 80% zużytych wyrobów gumowych stanowią opony zanieczyszczające środowisko naturalne. Od lat zwiększa się ich ilość. Rozwiązaniem problemu może być odzysk oraz recykling [8]. Odpady gumowe pochodzące w głównej mierze z przemysłu motoryzacyjnego, a także z branży AGD poddawane są recyklingowi.

W wyniku recyklingu materiałowego otrzymywane są materiały gumowe o różnych frakcjach: strzępy; cipsy; grys; ścier; granulat; miał [10]. Zastosowanie tak uzyskanych materiałów uzależnione jest od frakcji. Strzępy i cipsy najczęściej pełnią funkcję izolacji termicznej i akustycznej [6]. Granulat gumowy stosowany jest z powodzeniem w budownictwie drogowym [4, 8], a miał do wykonywania wykładzin i modyfikacji asfaltów [9]. Podejmowane są także badania nad wykorzystaniem granulatu gumowego jako zamiennika zazwyczaj drobnych frakcji kruszywa mineralnego do produkcji betonów cementowych. Zwiększenie ilości granulatu gumowego w mieszance betonowej powoduje zmniejszenie wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie oraz modułu Younga [6]. Wyniki badań [2] wykazały, że mimo tego dodatek granulatu do betonu jest interesującym rozwiązaniem, ponieważ powoduje zwiększenie mrozoodporności, a także zmniejszenie jego gęstości oraz zwiększenie odporności na uderzenia w porównaniu z betonem konwencjonalnym [3]. Wytrzymałość betonu zależy od frakcji granulatu gumowego [5]. Beton z granulatem o większych frakcjach wykazywał większy spadek nośności niż beton z granulatem o mniejszej frakcji. W badaniach [7] stwierdzono przydatność granulatu gumowego w betonach wysokowartościowych, jeżeli jego ilość nie będzie przekraczała 15% masy kruszywa. W badaniach zapraw cementowych z dodatkiem granulatu gumowego [11] określono optymalną ilość granulatu ze względu na stosunek wytrzymałości na ściskanie i zginanie, odporność na uderzenia i skurcz. Podejmowane były też próby jednoczesnego zastosowania w betonie granulatu gumowego SBR z innymi materiałami z recyklingu np. płatkami politereftalanu etylenu PET [1].

We wszystkich cytowanych badaniach stwierdzono zmniejszenie **wytrzymałości betonu na ściskanie ze wzrostem ilości granulatu gumowego**, co powoduje ograniczone zastosowanie gumobetonów w elementach konstrukcyjnych.

[1)] Uniwersytet Zielonogórski; Instytut Budownictwa
[2)] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Oddział w Szczecinie
[*)] Adres do korespondencji: j.korentz@ib.uz.zgora.pl

W artykule przedstawiono wyniki badań zapraw cementowych z miałem gumowym SBR pochodzącym z recyklingu odpadów gumowych. Motywem wykonanych badań było działanie proekologiczne polegające na wykorzystaniu przetworzonych odpadów pochodzących z elementów gumowych ze sprzętu AGD, uszczelek samochodowych i taśmociągów przemysłowych. Zagospodarowanie odpadów gumowych ma aspekt ekologiczny i ekonomiczny. Pozwala chronić środowisko naturalne i zmniejszyć koszty pozyskania składników do produkcji różnych materiałów.

Opis przeprowadzonych badań

Celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości częściowego zastąpienia spoiwa cementowego w zaprawach cementowych miałem gumowym z zachowaniem właściwości mechanicznych i fizycznych mieszanki betonowej oraz betonu stwardniałego. Działanie takie ma na celu zmniejszenie kosztów produkcji betonu przy jednoczesnym zapewnieniu dobrej jego jakości.

Badania zapraw cementowych obejmowały następujące parametry: wytrzymałość na zginanie po 2 i 28 dniach dojrzewania; wytrzymałość na ściskanie po 2 i 28 dniach dojrzewania, gęstość stwardniałych zapraw cementowych po 2 i 28 dniach dojrzewania oraz ich nasiąkliwość.

Materiały. Do wykonania zapraw użyto cementu CEM I 42,5R. Właściwości użytkowe wyrobu przyjęto z deklaracji producenta. Na potrzeby badań nie weryfikowano takich właściwości, jak stałość objętości czy początek i koniec czasu wiązania cementu.

Zgodnie z normą PN-EN 196-1 zastosowano piasek normowy CEN oraz wodę destylowaną o temperaturze 20°C. Jako dodatek do zaprawy stosowano różne ilości miału gumowego SBR o średnicy mniejszej od 1 mm, powstające w procesie odsiewania podczas produkcji granulatu gumowego. Producentem granulatów EPDM i SBR z recyklingu, pochodzących z różnego rodzaju uszczelek i taśmociągów, jest firma **Unirubber** z Zielonki k. Węglińca.

Receptury wykorzystane do wykonania zarobów. W tabeli zamieszczono skład zarobów zapraw cementowych z dodatkiem miału gumowego SBR. Procentowa jego zawartość w stosunku do masy cementu była następująca: 0; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50 i 60%.

Skład zarobów zapraw cementowych
Angielski

Zawartość gumy SBR [%]	Ilość piasku CEN [g]	Ilość gumy SBR [g]	Ilość wody [g]	Ilość cementu [g]
0	1350	0	225	450
5		22,5		
10		45,0		
15		67,5		
20		90,0		
25		112,5		
30		135,0		
40		180,0		
50		225,0		
60		270,0		

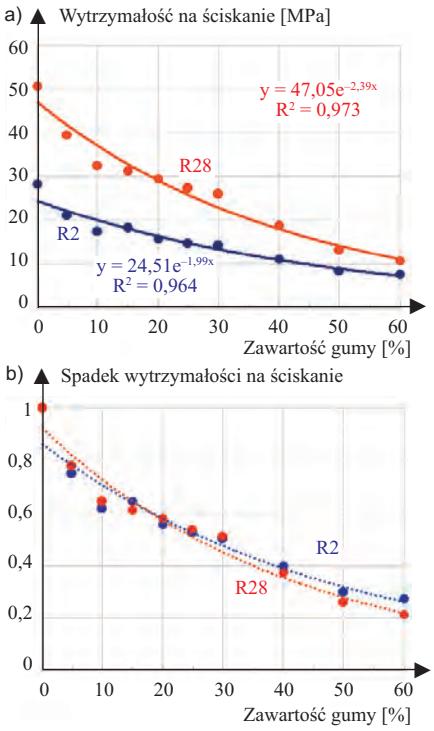
Wszystkie zaprawy składały się z trzech części piasku wzorcowego, jednej części cementu i pół części wody. Optymalna zawartość poszczególnych składników do wykonania jednego zaboru wynosiła 1350 g piasku wzorcowego, 450 g cementu i 225 g wody.

Metoda badawcza. Badania przeprowadzono zgodnie z PN-EN 197-1 *Cementy Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku* oraz PN-EN 196-1 *Metody badania cementu Część 1: Oznaczanie wytrzymałości*. Metodę badawczą zmodyfikowano przez dodanie do zaprawy wzorcowej miału gumowego SBR.

Wyniki badań

Wytrzymałość na zginanie określono na podstawie przełamywania beleczek cementowych na urządzeniu realizującym schemat statyczny trójpunktowego zginania, natomiast **wytrzymałość na ściskanie** badano podczas ściskania przełamanych beleczek cementowych. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie zaprawy wzorcowej i zapraw z różną zawartością miału z gumy po dwóch (R2) i 28 (R28) dniach dojrzewania zamieszczono na rysunku 1.

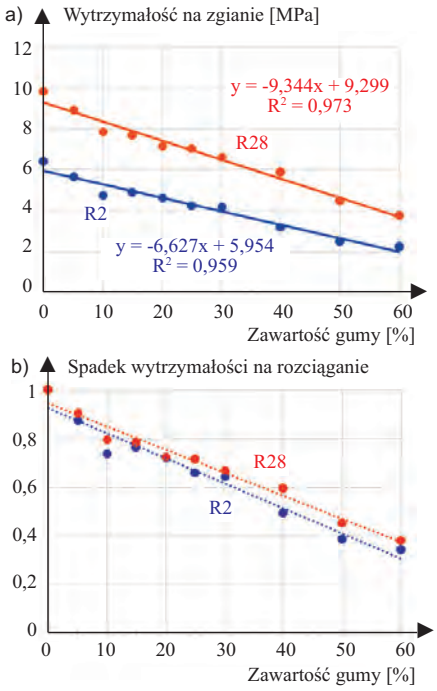
Wytrzymałość zaprawy na ściskanie po 2 i 28 dniach dojrzewania zmienia się w bardzo podobny sposób. Zmiany te można opisać funkcją wykładniczą. Wytrzymałość na ściskanie zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości dodatku miału gumowego SBR. Już dodatek w ilości 5% masy cementu (22,5 g gumy) powoduje zmniejszenie wytrzymałości na poziomie 22%. Największy spadek wytrzymałości na ściskanie (nie przekraczający 80%) ma miejsce, gdy dodatek gumy wynosi 60%. Z rysunku 1a wynika także, że ze wzrostem ilości gumy maleje przyrost wytrzymałości na ściskanie pomiędzy 2 i 28 dniem dojrzewania.



Rys. 1. Wpływ ilości miału gumowego na: a) wytrzymałość na ściskanie; b) względny spadek wytrzymałości na ściskanie po 2 i 28 dniach dojrzewania
Fig. 1.

Wyniki badania wytrzymałości zapraw na rozciąganie przy zginaniu zamieszczono na rysunku 2. Zmiana wytrzymałości na rozciąganie zależy liniowo od zawartości gumy w zarobie. Z uzyskanych wyników widać silną tendencję spadku wytrzymałości na rozciąganie wraz ze wzrostem zawartości dodatku gumy, ale jest on mniejszy niż spadek wytrzymałości na ściskanie. W przypadku maksymalnej zawartości gumy w zarobie spadek wytrzymałości na rozciąganie nie przekracza 70%.

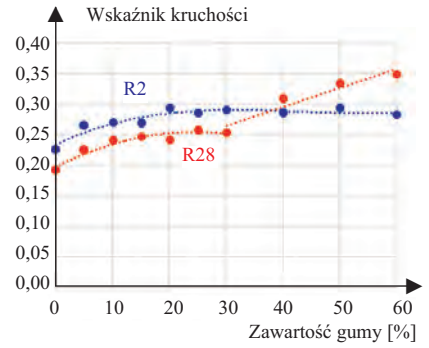
Beton jest materiałem kruchym, ponieważ różnica pomiędzy jego wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie jest



Rys. 2. Wpływ ilości miału gumowego na wytrzymałość na rozciąganie po 2 i 28 dniach dojrzewania na: a) wytrzymałość na rozciąganie; b) względny spadek wytrzymałości na rozciąganie
Fig. 2.

duża. Miarą kruchości jest **wskaźnik kruchości** zdefiniowany jako iloraz wytrzymałości na rozciąganie i wytrzymałości na ściskanie. Przyjmuje się, że jeżeli jest on mniejszy od 1/8, to materiał nazywamy kruchym. Na rysunku 3 pokazano wskaźnik kruchości zaprawy bez dodatku i z dodatkiem miału gumowego po 2 i 28 dniach dojrzewania.

Rozpatrując wyniki badań w kontekście stosunku wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie wi-



Rys. 3. Wpływ ilości miału gumowego na wskaźnik kruchości
Fig. 3.

dać zdecydowany przyrost wytrzymałości na zginanie poszczególnych próbek względem wytrzymałości na ściskanie. W przypadku wytrzymałości po dwóch dniach dojrzewania wskaźnik kruchości, po przekroczeniu 20% zawartości gumy, utrzymuje się na stałym poziomie i wynosi ok. 0,28. Natomiast w przypadku wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania wskaźnik kruchości zwiększa się ze wzrostem ilości gumy i osiąga 0,25, gdy zawartość gumy nie przekracza 30%. Po przekroczeniu tej ilości wskaźnik kruchości zwiększa się liniowo do 0,35.

Zaskakujący jest fakt, iż przy małej wytrzymałości na ściskanie i dużej zawartości gumy następuje przyrost wytrzymałości na zginanie nawet o przeszło 30% w odniesieniu do wytrzymałości na ściskanie. Dodatek gumy powoduje, że zaprawa staje się materiałem mniej kruchym. **Im większa zawartość gumy tym mniejsza kruchość zaprawy.**

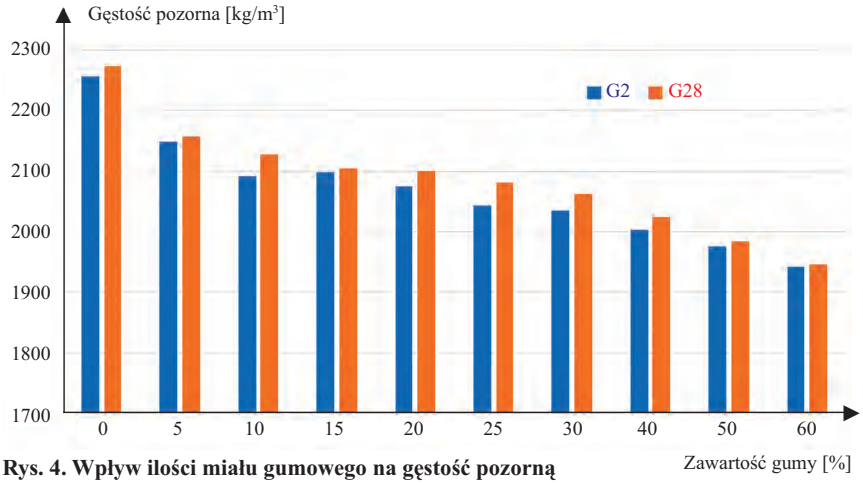
Zmianę gęstości pozornej zapraw w stanie nasycenia wodą, z różną zawartością domieszki gumy po 2 i 28 dniach dojrzewania przedstawiono na rysunku 4. Uzyskane wyniki badań pokazują dosyć duży spadek gęstości pozornej wraz ze wzrostem dodatku miału gumowego. W przypadku zawartości 60% spadek gęstości pozornej wynosi ok. 15%. Oznacza to szansę na zastosowanie tego materiału w miejscach, gdzie mała gęstość ma znaczny wpływ na odciążenie konstrukcji lub elementu. Należy jednak pamiętać, że zmniejszenie gęstości jest wprost proporcjonalne do spadku wytrzymałości na ściskanie i zginanie zapraw cementowych z dodatkiem miału gumowego.

Nasiąkliwość zapraw oznaczono w celu oceny wpływu dodatku gumy na uszczelnienie mieszanki betonowej. Badaniu poddano próbki po określeniu wytrzymałości na ściskanie i zginanie po 28 dniach dojrzewania (rysunek 5).

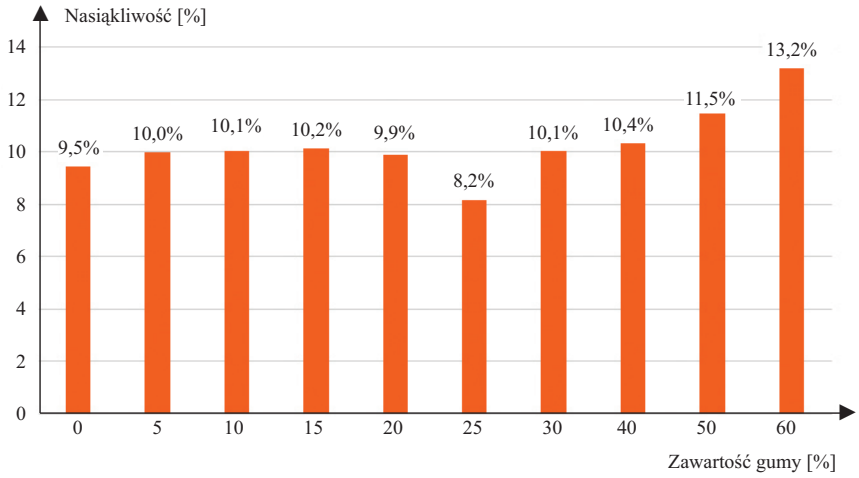
Zdecydowana większość uzyskanych wyników nasiąkliwości oscyluje w granicach 10%. Seria wzorcowa wykazała nasiąkliwość na poziomie 9,5%. Miał gumowy nie wpływa w istotny sposób na nasiąkliwość zapraw, jeżeli jego zawartość nie przekracza 30%. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że w przypadku 25% SBR nastąpił wyraźny spadek nasiąkliwości zapraw. Niepokojący jest fakt, że powyżej 30% zawartości gumy następuje zauważalny wzrost nasiąkliwości, pokrywający się ze wzrostem dodatku miału w zaprawach cementowych.

Podsumowanie

Badania przeprowadzone za zaprawach cementowych wykazały **duży spadek wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu wraz ze wzrostem zawartości miału gumowego**. Spadek wytrzymałości na ściskanie wynosił ok. 40 i 80% w przypadku zawartości miału gumowego odpowiednio 20 i 60%. Spadek wytrzymałości na rozciąganie, w przypadku takiej samej zawartości gumy, był mniejszy o 10% w porównaniu ze spadkiem wytrzymałości na ściskanie i wynosił odpowiednio 30 i 70%.



Rys. 4. Wpływ ilości miału gumowego na gęstość pozorną
Fig. 4.



Rys. 5. Wpływ ilości miału gumowego na nasiąkliwość
Fig. 5.

Ze wzrostem zawartości miału gumowego zaprawa cementowa staje się mniej kruchym, ponieważ zwiększa się stosunek wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie.

Zgodnie z oczekiwaniami, **dodatek miału gumowego powoduje obniżenie gęstości pozornej zaprawy**. W przypadku 60% zawartości miału gumowego gęstość pozorna maleje o ok. 15% w porównaniu z zaprawą wzorcową. **Nasiąkliwość zapraw utrzymuje się mniej więcej na stałym poziomie tj. ok. 10% przy zwartości gumy do 30%** i jest porównywalna z nasiąkliwością zaprawy wzorcowej wynoszącej 9,5%. Po przekroczeniu 30% zawartości gumy nasiąkliwość zapraw wyraźnie się zwiększa.

Uzyskane wyniki badań potwierdzają ograniczone możliwości zastosowania miału gumowego w betonowych elementach konstrukcyjnych ze względu na duży spadek wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie. Tym niemniej **zastosowanie granulatu gumowego w ilości do 10% jest do zaakceptowania**.

Betony z dodatkiem gumy wykazują inne ciekawe cechy, które pozwalają na ich zastosowanie w elementach niekonstrukcyjnych, gdy zależy nam na zmniejszeniu ciężaru właściwego oraz poprawie izolacyjności cieplnej.

Podziękowania. *Autorzy składają podziękowanie firmie Unirubber sp. o.o. za przekazanie granulatów gumowych do przeprowadzonych badań doświadczalnych.*

Literatura

[1] Adamczyk I. 2019. „The analysis of the compression strength of concrete modified with rubber granules SBR and polyethene terephthalate". *ZeszystyNaukowePolitechnikiCzęstochowskiej, Budownictwo*, (25): 9 – 14.

[2] Bjegović D., A. Baricević, M. Serdar. 2011. „Durability properties of concrete with recycled waste tyres". XII International Conference an Durability of Building Materials and Components (DBMC)", Porto, Portugal, 12-15 April.

[3] Gerges N. N., C. A. Issa, S. R. Fawaz. 2018. „Rubber concrete: Mechanics and dynamical properties". *Case Studies in Construction Materials*, (9), e00184.

[4] Jurczak R. 2012. „Badania i ocena wpływu granulatu gumowego na właściwości betonu asfaltowego". *Izolacje*, (3): 27 – 30.

[5] Jusli E., H. M. Nor, R. P. Jaya, Z. Haton. 2015. „Effect of rubber tyre rranules on concrete strength and the microstructure characteristics of rubberized concrete". *Applied Mechanics and Materials* (773 – 774): 928 – 932.

[6] Kamiński M., Cz. Bywalski, M. Maszczak. 2013. „Zastosowanie granulatu gumowego w betonie". *Materiały Budowlane* 487 (3): 30 – 31.

[7] Silva F. M., E. J. P. Miranda, J. M. C. Dos Santos, L A. Gache-Barbarosa, A. E. Gomes, R. C. C. Lintz. 2019. „The use of tire rubber in the production of high-performance concrete". *Cerâmica* (65), Suppl. 1: 110 – 114.

[8] Sybiliski D. 2009. „Zastosowanie odpadów gumowych w budownictwie". *Przegląd Budowalny* (5): 37 – 44.

[9] Trzaska E. 2009. „Zastosowanie zużytych opon samochodowych w budownictwie drogowym". *Przegląd Budowlany* (5): 37 – 44.

[10] Wojciechowski A., R. Michalski, E. Kamińska. 2012. „Wybrane metody zagospodarowania zużytych opon". *Polimery* (57) 9: 656 – 660.

[11] Xue G., M-l Cao. 2017. „Effect of modified rubber particles mixing amount on properties od cement mortar". *Advances of Civil Engineering*: 8643839.

Przyjęto do druku: 23.11.2020 r.

J. Korentz, R. Jurczak, F. Szmatuła, Cement Wapno Beton, 25(5) (2020), 367-375
doi: https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.5.3

cement wapno beton

Właściwości betonu z dodatkiem kruszywa z żużla pomiedziowego
Properties of concrete with the addition of copper slag aggregate

Jacek Korentz[1], Robert Jurczak[2,3], Filip Szmatuła[3]

[1] University of Zielona Góra
[2] West Pomeranian University of Technology in Szczecin
[3] General Directorate for National Roads and Motorways (GDDKiA) Branch in Szczecin

*corresponding author: J. Korentz, e-mail: j.korentz@ib.uz.zgora.pl

Streszczenie

W ostatnim okresie zapotrzebowanie na różnego rodzaju kruszywa w Polsce jest bardzo znaczne. Zasoby kruszyw naturalnych kurczą się, a ich eksploatacja ma bardzo duży wpływ na środowisko. Dlatego kruszywa z recyklingu i kruszywa sztuczne, w tym kruszywa z żużla pomiedziowego, są coraz częściej stosowane w budownictwie drogowym oraz kolejowym, a także budownictwie ogólnym. W artykule zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych dotyczących możliwości zastosowania kruszywa z żużla pomiedziowego do produkcji betonów konstrukcyjnych, które poza odpowiednią wytrzymałością na ściskanie były odporne na warunki atmosferyczne, a tym samym mogły mieć zastosowanie w obiektach mostowych, drogowych lub innych obiektach narażonych na tak szczególne warunki. W przeprowadzonych badaniach dokonano oceny cech fizycznych i mechanicznych materiałów wchodzących w skład betonu, ale główny nacisk położono na badania wpływu ilości kruszyw z żużla pomiedziowego na podstawowe właściwości betonu, a mianowicie: wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość i mrozoodporność. Wyniki badań wykazały, że kruszywo z żużla pomiedziowego z powodzeniem może zastąpić kruszywo naturalne w betonach cementowych. Kruszywo to wykazywało lepsze właściwości niż użyte w betonach wzorcowych kruszywo granitowe. Wszystkie betony badane po 28 dniach spełniły warunki dotyczące wytrzymałości. Dla betonów o zawartości kruszyw z żużla pomiedziowego 25% i 50% nastąpił kilkuprocentowy przyrost wytrzymałości na ściskanie. Natomiast dla betonów z 75% i 100% udziałem tego kruszywa odnotowano zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o 14%. Nasiąkliwość betonu wzorcowego wypadła gorzej niż wszystkich betonów zawierających kruszywo z żużla pomiedziowego. Zarówno beton wzorcowy jak i wszystkie betony z kruszywem z żużla pomiedziowego spełniają wymagania dla stopnia mrozoodporności F150. Wytrzymałość na ściskanie betonów z kruszywem z żużla pomiedziowego po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania zmniejsza się maksymalnie o 4%.

Summary

Recently, the demand for various types of aggregates in Poland has been very significant. The resources of natural aggregates are shrinking and their exploitation has a large environmental impact. Recycled and artificial aggregates, including copper slag aggregates, are therefore increasingly used in road and railway construction as well as in general construction works. The paper presents the results of experimental research concerning the possibility of using copper slag aggregates for the production of structural concretes which, apart from their adequate compressive strength, were resistant to atmospheric conditions and thus could be used in bridges, roads, or other objects exposed to such special conditions. In the conducted research, the physical and mechanical characteristics of the materials included in the concrete were assessed, but the main emphasis was put on the research on the influence of the quantity of copper slag aggregates on the basic properties of concrete such as: compressive strength, water absorption, and freeze-thaw durability. The results of the research showed that copper aggregate can successfully replace natural aggregate in cement concretes. The copper slag aggregate showed better properties than the granite aggregate used in the reference concrete. All the concretes tested after 28 days met the concrete strength requirements. For the concretes with a copper slag aggregate content of 25% and 50% there was a few percent increase in compressive strength. On the other hand, for the concretes with 75% and 100% of the copper slag aggregate, compression strength drops of up to 14% were recorded. The water absorption of the reference concrete was worse than that of all the concretes containing copper slag aggregates. Both the reference concrete and all the concretes with copper slag aggregate meet the requirements for freeze-thaw durability grade F150. Concretes with copper slag aggregate subjected to 150 freezing and thawing cycles exhibit a compression strength drop of up to 4%.

Słowa kluczowe: Beton, kruszywo z żużla pomiedziowego, wytrzymałość, nasiąkliwość, mrozoodporność

Keywords: Concrete, copper slag aggregate, strength, absorbability, freeze-thaw durability

1. Wprowadzenie

Zgodnie z normą PN-EN 12620+A1:2010 *Kruszywa do betonu* wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje kruszyw: kruszywa naturalne: łamane i żwirowe, kruszywa sztuczne, kruszywa z recyklingu. Kruszywa alternatywne stanowią bardzo ważne uzupełnienie rynku kruszyw naturalnych (1). Do kruszyw sztucznych zaliczane są także kruszywa produkowane z wtórnych surowców odpadowych powstających między innymi w hutnictwie metali kolorowych. Głównym, a także jedynym producentem kruszyw z żużla pomiedziowego w Polsce jest spółka skarbu państwa KGHM Polska Miedź SA– czołowy producent miedzi na świecie. Kruszywa z żużla pomiedziowego produkowane są z żużli z pieców szybowych i pieców elektrycznych. Technologia produkcji kruszyw z żużla z pieca elektrycznego polega na wylewaniu płynnego żużla do specjalnych dołów żużlowych w warstwach o określonej grubości, w określonych przedziałach czasowych, a następnie kruszenie na odpowiednie frakcje (2). Materiał ten w 96,5% stanowią składniki skałotwórcze. W efekcie żużel pomiedziowy składem chemicznym przypomina bazalt i gabro. W polskim przemyśle miedziowym rocznie powstaje 1,3 mln ton produktów ubocznych, z czego około 95% to szybowy oraz granulowany żużel pomiedziowy (3). Aktualnie produkuje się około 0,7 mln ton kruszyw z żużla pomiedziowego rocznie, co stanowi około 10% udziału w rynku kruszyw sztucznych w Polsce. Są to kruszywa drobne [frakcja 0-5 mm], grysy o różnych frakcjach [5-22 mm], mieszanki do stabilizacji i kruszywa o uziarnieniu ciągłym (4). Kruszywa te są głównie wykorzystywane w budownictwie drogowym na warstwy podbudowy, a także warstwy stabilizacyjne.

Prowadzone są liczne badania pod kątem zastosowania kruszyw z żużla pomiedziowego w betonach cementowych. Badania wpływu ilości kruszywa z żużla pomiedziowego na właściwości zaprawy cementowej i betonu wykazały, że dodatek drobnych frakcji kruszywa z żużla powoduje zwiększenie wytrzymałości na ściskanie zapraw cementowych, a w przypadku betonu wytrzymałość na ściskanie jest na porównywalnym poziomie (5). Badania dotyczące zastosowania kruszywa z żużla pomiedziowego, jako zamiennika kruszywa naturalnego w betonach o wytrzymałości większej niż 150 MPa wykazały, że zastosowanie kruszywa z żużla pomiedziowego powoduje zmniejszenie 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie w granicach 15% - 25%, podczas gdy wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu jest podobna (6). Według badań wytrzymałość na ściskanie betonu z kruszywem z żużla pomiedziowego zwiększa się ze zwiększeniem dodatku tego kruszywa i jest większa maksymalnie o około 18% niż wytrzymałość betonu wzorcowego (7). W pracy badano wpływ dodatku drobnego kruszywa z żużla pomiedziowego na wytrzymałość betonu na ściskanie, a także na moduł Younga oraz odporność na oddziaływanie kwasu siarkowego (8). Moduł Younga w zależności od ilości

1. Introduction

According to the standard PN-EN 12620+A1:2010 *Concrete aggregates*, three basic types of aggregates are distinguished: natural aggregates [crushed rock and gravel], artificial aggregates, and recycled aggregates. Alternative aggregates are a very important complement to the natural aggregates market (1). Aggregates produced from secondary waste raw materials, including those produced in the non-ferrous metallurgy, are also included. The main, and also the only producer of copper slag aggregates in Poland is the state-owned company KGHM Polska Miedź – the world's leading copper producer. Copper slag aggregates are produced from slag from shaft furnaces and electric furnaces. The technology for the production of slag aggregates from an electric furnace consists of pouring liquid slag into special slag pits in layers of a certain thickness, at specified intervals, and then crushing into suitable fractions (2). This material is composed of 96.5% of rock-forming components. As a result, the chemical composition of the copper slag resembles basalt and gabbro. The Polish copper industry produces 1.3 million tones of by-products annually, of which approximately 95% is a shaft and granulated copper slag (3). Currently, approximately 0.7 million tones of copper slag aggregates are produced annually, which accounts for approximately 10% of the market share of artificial aggregates in Poland. These are fine aggregates [0-5 mm fraction], chippings with different fractions [5-22 mm], mixtures for stabilisation and continuous-grained aggregates (4). These aggregates are mainly used in road construction for the base and sub-base layers as well as stabilisation layers.

Numerous studies are being carried out on the use of copper wastes aggregates in cement concretes. The research on the effect of the quantity of copper slag aggregate on the properties of cement mortar and concrete have shown that the addition of fine fractions of copper slag aggregate increases the compressive strength of cement mortars, and in the case of concrete, the compressive strength is at a comparable level (5). Studies on the use of copper slag aggregate as a substitute for natural aggregate in concretes with a strength greater than 150 MPa have shown that the use of copper slag aggregate results in a reduction of 28-day compressive strength between 15% and 25%, while the flexural strength is at a comparable level (6). According to the research, the compressive strength of concrete with copper slag aggregate increases with an increase in the quantity of this aggregate and is at most 18% higher than that of the control concrete(7). In the study, the effect of the quantity of fine copper slag aggregate on the compressive strength of concrete, as well as on Young's modulus and resistance to sulphuric acid was investigated (8). Young's modulus can be up to 42% higher than Young's modulus of concrete with natural aggregates, depending on the quantity of the copper slag aggregate.

kruszywa z żużla pomiedziowego może być do 42% większy niż moduł Younga betonu z kruszywem naturalnym. Z kolei badania wykazały, że zastąpienie kruszywa naturalnego kruszywem z żużla pomiedziowego powoduje niewielki wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach, maksymalnie o 3,2% (9). Jednak korzyści z zastosowania kruszywa z żużla pomiedziowego są większe w przypadku wytrzymałości betonu na rozciąganie i zginanie. Wzrost wytrzymałości jest bliski 10%. Prowadzone były także badania, nad zastosowaniem zmielonego kruszywa z żużla pomiedziowego, jako dodatku do betonu w celu częściowego zastąpienia cementu (10, 11). Wyniki tych badań pokazują, że kilkuprocentowy dodatek zmielonego żużla pomiedziowego powoduje widoczny wzrost wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej. Według opracowania frakcje kruszywa z żużla pomiedziowego i jego ilość w mieszance betonowej mogą mieć zarówno pozytywny jak i negatywny wpływ na właściwości mechaniczne, a także fizyczne betonu stwardniałego (12). Kruszywo z żużla pomiedziowego w ilości mniejszej niż 40% całkowitej masy kruszywa poprawia wytrzymałość betonu na ściskanie, jego urabialność, skurcz, odporność na działanie chlorków. Z kolei ilość tego kruszywa większa niż 40-50% ma negatywny wpływ na wytrzymałość betonu na ściskanie i jego odporność na oddziaływanie kwasów. Mimo już licznych badań doświadczalnych konieczne są dalsze badania dotyczące właściwego doboru frakcji kruszywa z żużla pomiedziowego w celu uzyskania odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie oraz wystarczającej odporności chemicznej, ścieralności, mrozoodporności czy odporności na karbonatyzację (12). Badania te pozwolą na określenie przydatności kruszyw z żużla pomiedziowego w produkcji betonu towarowego o zróżnicowanym przeznaczeniu.

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wpływu zastąpienia kruszyw naturalnych kruszywem z żużla pomiedziowego na wytrzymałość betonu na ściskanie, jego nasiąkliwość i mrozoodporność. Celem tych badań było określenie ilości kruszywa z żużla pomiedziowego, którą można zastosować, jako zamiennik kruszywa naturalnego tak, aby właściwości mechaniczne betonu i jego odporność na oddziaływania środowiskowe spełniały odpowiednie wymagania normowe.

2. Wyniki badań materiałów i mieszanki betonowej

2.1. Materiały

W badaniach zastosowano cement portlandzki o wysokiej wytrzymałości wczesnej CEM I 42,5R firmy LafargeHolcim, zakład Kujawy w Bielawach. Przeprowadzone badania cementu dały następujące wyniki: początek czasu wiązania 174 min, koniec czasu wiązania 315 min, wytrzymałość na zginanie 7,8 MPa, wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach 28,5 MPa, a po 28 dniach 50,2 MPa, wodożądność 30%.

Do wykonania mieszanki betonowej zastosowano piasek naturalny z Kopalni Surowców Naturalnych Mielenko Drawsko Pomorskie,

In turn, the research has shown that replacing natural aggregate with copper slag aggregate results in a slight increase in concrete compressive strength after 28 days; maximum 3.2% (9). However, the benefits of copper slag aggregate are greater for the tensile and flexural strength of concrete. The strength increase is close to 10%. Research has also been carried out on the use of ground copper slag aggregate as a concrete admixture to partially replace cement (10, 11). The results of these studies show that a few percent addition of ground copper slag results in a visible increase in the compressive strength of the cement mortar. According to the studies, the fractions of copper slag aggregate, its amount in the concrete mix has a positive and negative impact on the mechanical and physical properties of hardened concrete (12). Aggregate in quantities lower than 40% of the total aggregate mass improves the compressive strength of concrete, its workability, shrinkage, and chloride resistance. On the other hand, an amount of copper slag aggregate greater than 40-50% has a negative impact on the compressive strength and acid resistance of concrete. In spite of the already numerous experimental studies, further research is needed on the proper selection of the fraction of copper slag aggregate, in order to obtain adequate compressive strength and sufficient chemical resistance, abrasion resistance, freeze-thaw durability, or carbonation resistance (12). Such research will enable us to determine increasingly broadly the impact of the use of copper slag aggregates in the production of ready-mixed concrete.

The paper presents the results of experimental research of the influence of substitution of natural aggregate with copper slag aggregate on the compressive strength of concrete, its water absorption and freeze-thaw durability. The purpose of these tests was to determine the amount of the copper slag aggregate that can be used as a substitute for natural aggregate, so that the strength parameters of concrete and its resistance to environmental impacts meet the relevant standard requirements.

2. Results of materials and concrete mix tests

2.1. Materials

In the tests Portland cement with high early strength CEM I 42.5R from LafargeHolcim, Kujawy plant in Bielawy was used. The cement tests carried out gave the following results: setting time initial174 min, setting time final 315 min, flexural strength 7.8 MPa, compressive strength after 2 days 28.5 MPa and after 28 days 50.2 MPa, water demand 30%.

Natural sand from the Mielenko Drawsko Pomorskie Natural Resources Mine, granite aggregate from the Rogoźnica II Granite Mine and copper slag aggregate from KGHM were used for the concrete mix. Table 1 shows the results of the sieve analysis of the aggregates used.

The following tests were carried out for aggregates: determination of crushing strength, determination of water absorption, determination of freezing and thawing resistance in water and in the presence of salt, determination of the shape of aggregate grains,

Tablica 1 / Table 1

WYNIKI ANALIZY SITOWEJ ZASTOSOWANYCH KRUSZYW

RESULTS OF SIEVE ANALYSIS OF THE AGGREGATES USED

Średnica / Diameter, mm	Piasek / Sand, 0÷2 mm, %	Kruszywo granitowe Granite aggregate, 4÷8 mm, %	Kruszywo granitowe Granite aggregate 8÷16 mm, %	Kruszywo pomiedziowe Copper slag aggregate 0÷31.5 mm, %
31.50				1.6
16.00			9.1	27.1
8.00		4.7	81.6	23.1
4.00		43.4	7.8	11.1
2.00	1.1	47.0	1.5	7.5
1.00	8.6	3.6		12.4
0.50	32.1	1.3		9.9
0.250	42.0			4.3
0.125	14.6			2.0
up to 0	1.6			1.1

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI KRUSZYW UŻYTYCH W BADANIACH

PROPERTIES OF AGGREAGTES USED IN EXPERIMENTS

Oznaczenie / Denotation	Kruszywo granitowe Granite aggregate		Kruszywo z żużla pomiedziowego Copper slag aggregate	
Frakcja / Fraction, mm	4/8	8/16	4/8	8/16
Wytrzymałość na miażdżenie / Crushing resistance, %	10.6	9.7	8.0	8.7
Nasiąkliwość / Water absorption, %	-	0.61	-	0.35
Mrozoodporność w wodzie / Freezing and thawing in water, %	0.10	0.10	0.17	0.14
Mrozoodporność w 1% roztworze soli / Freezing and thawing in the presence of salt, %	0.07	0.10	0.07	0.08
Zawartość ziaren nieforemnych / Flakiness index, %	13.5	10.5	19.4	12.1
Zawartość zanieczyszczeń obcych / Foreign impurities content, %	0.00	0.04	0.05	0.07
Rozpad żelazowy / Iron decay, %	0.04	0.04	0.02	0.03
Gęstości nasypowa w stanie luźnym / Loose bulk density, kg/m^3	1331	1404	1532	1581
Gęstości właściwa / Density, kg/m^3	-	2628	-	3085
Zawartości ziaren słabych / Weak grains content, %	-	13.9	-	6.4

kruszywo granitowe z Kopalni Granitu Rogoźnica II i kruszywo pomiedziowe z KGHM. W tablicy 1 zamieszczono wyniki analizy sitowej zastosowanych kruszyw.

Dla kruszyw przeprowadzono następujące badania: oznaczenie wytrzymałości na miażdżenie, oznaczenie nasiąkliwości, oznaczenie mrozoodporności w wodzie i w obecności soli, oznaczenie kształtu ziaren kruszywa, oznaczenie zanieczyszczeń obcych w kruszywie, oznaczenie rozpadu żelazowego kruszywa, oznaczenie gęstości nasypowej, oznaczenie gęstości właściwej oraz zawartości słabych ziaren kruszywa. W tablicy 2 zamieszczono wyniki przeprowadzonych badań właściwości kruszywa naturalnego i kruszywa z żużla pomiedziowego.

Wyniki przeprowadzonych badań, zamieszczone w tablicy 2, pokazują, że kruszywo z żużla pomiedziowego ma wyraźnie lepszą wytrzymałość na miażdżenie, mniejszą nasiąkliwość, lepszą

determination of foreign impurities in the aggregate, iron decay, determination of bulk density, determination of specific density and content of weak aggregate grains. Table 2 presents the results of the research on the properties of natural aggregate and copper slag aggregate.

The results of the tests, presented in Table 2, show that the copper slag aggregate has a significantly higher crushing strength, lower water absorption, better frost resistance in 1% salt solution and the smaller content of weak grains than natural granite aggregate. Other properties of granite aggregate and copper slag aggregate are similar.

Fig. 1 shows the grain size limit curves and the designed grain size curve of the basic mixture, used in the research.

mrozoodporność w 1% roztworze soli i mniejszą zawartość ziaren słabych, niż naturalne kruszywo granitowe. Pozostałe cechy kruszywa granitowego i kruszywa z żużla pomiedziowego są podobne.

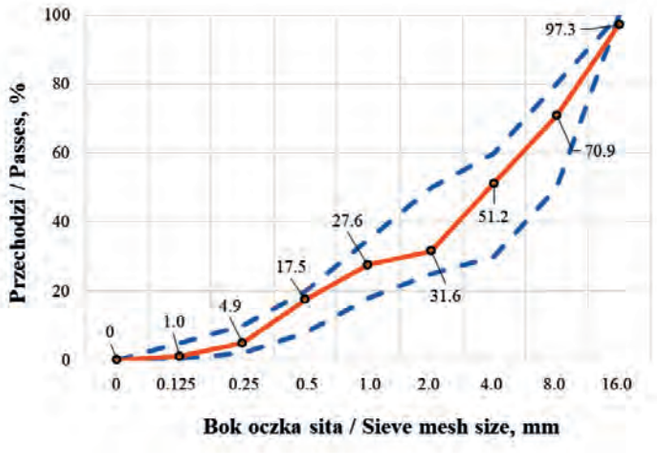
Na rys. 1 zamieszczono krzywe graniczne uziarnienia i projektowaną krzywą uziarnienia mieszanki podstawowej zastosowanej w badaniach.

Projektowaną krzywą uziarnienia przyjęto za wzorcową. Na podstawie krzywej wzorcowej dobrano uziarnienie dla wszystkich wykonywanych mieszanek betonowych, ustalając odpowiednie stosunki procentowe poszczególnych frakcji kruszywa.

2.2. Mieszanka betonowa

W badaniach zaprojektowano beton klasy C30/37. Określenie składu mieszanki betonowej zostało poprzedzone oznaczeniem wodożądności cementu oraz analizą sitową poszczególnych kruszyw, przewidywanych do zastosowania w mieszance betonowej. Zaprojektowano pięć mieszanek betonowych: jedną wzorcową, bez kruszywa z żużla pomiedziowego oznaczoną jako CS0 i cztery z kruszywem z żużla pomiedziowego w ilości 25%, 50%, 75% i 100% masowo w stosunku do kruszywa granitowego, oznaczone odpowiednio symbolami CS25, CS50, CS75 i CS100. Uziarnienie kruszywa dla poszczególnych mieszanek dobrano tak, aby poszczególne krzywe uziarnienia przypadały pomiędzy krzywymi granicznymi wg. normy PN-88/B-06250 *Beton zwykły*. Wszystkie mieszanki miały taki sam wskaźnik wodno-cementowy w/c = 0,47. Dla wszystkich mieszanek zastosowano stałą ilość domieszki napowietrzającej i poprawiającej urabialność. Dla wszystkich mieszanek oznaczono konsystencję metodą opadu stożka i zawartość powietrza w mieszance betonowej metodą ciśnieniową. Wyniki tych badań zamieszczono w tablicy 3.

Wyniki zamieszczone w tablicy 3 pokazują, że zwiększenie dodatku kruszywa z żużla pomiedziowego zwiększa płynność mieszanki betonowej, której konsystencja zmienia się z gęstoplastycznej S2 dla mieszanki CS25 i CS50 na plastyczną S3 dla mieszanki CS75 i CS100. Jest to efekt wodożądności kruszywa, która maleje wraz ze wzrostem ilości kruszywa z żużla pomiedziowego. Zwiększona ilość kruszywa z żużla pomiedziowego powoduje nieznaczny wzrost zawartości powietrza w mieszance betonowej. Zwiększanie ilości kruszywa z żużla pomiedziowego powoduje także wzrost gęstości mieszanki betonowej, co jest wynikiem różnic w gęstości właściwej kruszywa granitowego i kruszywa z żużla pomiedziowego.



Rys. 1. Graniczne krzywe uziarnienia i projektowana krzywa uziarnienia mieszanki podstawowej zastosowanej w badaniach

Fig. 1. Upper and lower recommended limit curves of grain size distribution and grain size distribution curve of the basic aggregate mix used in the research

The designed grain size curve was taken as a benchmark. On the basis of the master curve, the grain size was selected for all the concrete mixes produced in appropriate percentage ratios of individual aggregate fractions.

2.2. Concrete mix

In the studies, class C30/37 concrete was designed. The determination of the concrete mix composition was preceded by the determination of the cement water demand and sieve analysis of individual aggregates, to be used in the concrete mix. Five concrete mixes were designed: one reference mix without the copper slag aggregate: CS0, and four mixes with copper slag aggregate in the amount of 25%, 50%, 75% and 100% by mass in relation to granite aggregate, marked with symbols CS25, CS50, CS75 and CS100 respectively. The aggregate grain size for individual mixes was selected so that individual grain size curves are between limit curves according to PN-88/B-06250 *Conventional concrete*. All the mixes had the same water-cement ratio w/c = 0.47. A constant content of air-entraining and workability improving admixture was used for all the mixes. The consistency was determined for all the mixes using the slump method and the air content in the concrete mixture using the pressure gauge method; the results of these tests are presented in Table 3.

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI BETONOWEJ

CONCRETE MIX PROPERTIES

Mieszanka / Mix	CS0	CS25	CS50	CS75	CS100
Opad stożka / Slump, mm	50	65	80	110	120
Klasa konsystencji / Consistency class, -	S2	S2	S2	S3	S3
Gęstość / Density, kg/m^3	2310	2380	2410	2440	2460
Zawartość powietrza / Air content, %	4.2	4.3	4.5	4.5	4.4

3. Wyniki badań betonu

Badania betonu miały na celu określenie wpływu dodatku kruszywa z żużla pomiedziowego na wytrzymałość betonu na ściskanie oraz jego mrozoodporność i nasiąkliwość. Wyniki tych badań stanowią podstawę oceny możliwości zastosowania betonu w warunkach narażenia na oddziaływanie czynników atmosferycznych.

3.1. Wytrzymałość na ściskanie

Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na próbkach sześciennych 150 mm x 150 mm x 150 mm. Wytrzymałość betonu badano po 7, 28 i 85 dniach dojrzewania. Dla każdej serii wytrzymałość na ściskanie obliczono na podstawie badań trzech próbek. Na rys. 1 przedstawiono wykresy słupkowe pokazujące wytrzymałość na ściskanie dla betonu wzorcowego oraz betonów z różnym dodatkiem kruszywa z żużla pomiedziowego.

Jak można zauważyć na wykresie na rys. 2 zastąpienie kruszywa naturalnego kruszywem z żużla pomiedziowego w mieszance betonowej powoduje nieznaczne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie betonu dla dodatku kruszywa nie większego niż 50%. Dotyczy to wytrzymałości po 7, 28 i 85 dniach dojrzewania. Dodatek kruszywa z żużla pomiedziowego do 50% powoduje wzrost wytrzymałości 28-dniowej maksymalnie o 3%. Natomiast, gdy udział kruszywa z żużla pomiedziowego przekracza 50% następuje zauważalny spadek wytrzymałości na ściskanie. Spadek ten mieści się w granicach 12-14%. Uzyskane wyniki badań potwierdzają inne badania (12). Optymalna ilość kruszywa z żużla pomiedziowego w betonie pod względem wytrzymałości na ściskanie wynosi 40 - 50%. Uzyskane wyniki badań pokazują, że dodatek kruszywa z żużla pomiedziowego niezależnie od jego ilości może być z powodzeniem stosowany w praktyce. Na podstawie tych wyników badań można prognozować dalszy wzrost wytrzymałości i właściwości fizycznych betonu z dalszym upływem czasu.

3.2. Mrozoodporność

Badania mrozoodporności betonu przeprowadzono metodą zwykłą zgodnie z normą PN-88/B-06250 *Beton zwykły*. Badania wykonano na próbkach sześciennych o boku 100 mm. Według tej normy stopień mrozoodporności betonu jest osiągnięty, jeżeli po wymaganej w jego symbolu liczbie cykli zamrażania/rozmrażania próbek betonowych, spełnione zostaną następujące warunki: próbki nie wykazują spękań, rys, złuszczeń oraz odprysków, a łączna masa ubytków betonu w postaci zniszczonych narożników i krawędzi, odprysków itp. nie przekracza 5% masy próbek przed rozpoczęciem cykli zamrażania/odmrażania oraz spadek wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości próbek niezamrażanych jest nie większy niż 20%. Liczbę cykli zamrażania

The results in Table 3 show that the increase in the amount of copper slag aggregate increases the fluidity of the concrete mix whose consistency changes from the S2 dense plastic consistency for the CS25 and CS50 mixes to the S3 plastic consistency for CS75 and CS100. This is the effect of the water demand of the aggregate, which decreases with the increase in the quantity of the copper slag aggregate. An increased amount of copper slag aggregate causes a slight increase in air content in the concrete mix. Increasing the amount of copper slag aggregate also causes an increase in the density of the concrete mix, which is the result of differences in the specific density of granite aggregate and copper slag aggregate.

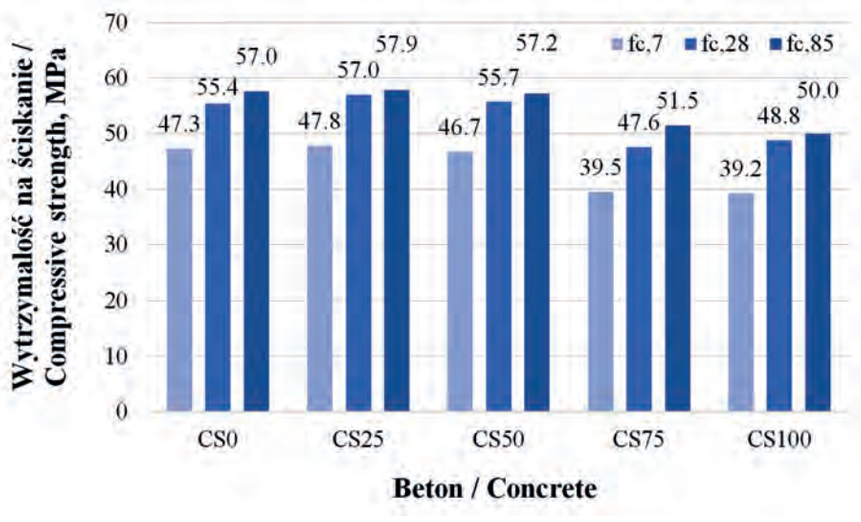
3. Results of hardened concrete tests

The studies on hardened concrete were aimed at determining the influence of the quantity of the copper slag aggregate on its compressive strength, freeze-thaw durability and water absorption. The results of these tests form the basis for assessing the possibility of using concrete exposed the effects of atmospheric conditions.

3.1. Compressive strength

The compressive strength tests were carried out on 150 mm x 150 mm x 150 mm cubic samples. The strength of concrete was tested after 7, 28 and 85 days of curing. For each batch, the compressive strength was calculated from three samples. Fig. 1 shows bar graphs illustrating the distribution of average compressive strength for control concrete and for concretes with different proportion of copper slag aggregate.

As can be seen in the diagram in Fig. 2, the replacement of natural aggregate by an aggregate from copper slag in the concrete mix results in a slight increase in the compressive strength of the concrete for up to 50%. This applies both to strength after 7, 28 and 85 days of maturation. The addition of copper slag aggregate up to 50% increases the 28-day strength by up to 3%. On the other



Rys. 2. Rozkład wytrzymałości na ściskanie 7-dniowej, 28-dniowej i 85 dniowej.

Fig. 2. Compressive strength distribution after 7 days, 28 days and 85 days.

i rozmrażania zwiększono do 150 przyjmując, że beton będzie cykliczne zamrażany i rozmrażany w wodzie oraz będzie narażony na oddziaływanie soli odladzających. W tablicy 4 zestawiono wyniki badań mrozoodporności badanych betonów.

Wyniki badań mrozoodporności zamieszczone w tablicy 4 pokazują, że beton bez i z kruszywem z żużla pomiedziowego ma bardzo dobrą odporność na cykliczne działanie mrozu. Wszystkie betony osiągnęły stopień mrozoodporność F150. Betony z kruszywem z żużla pomiedziowego wykazują nieznaczny spadek wytrzymałości na ściskanie, w porównaniu z betonem wzorcowym.

3.3. Nasiąkliwość

Badania nasiąkliwości betonu wykonano zgodnie z normą PN--88/B-06250. Badanie nasiąkliwości betonu polega na określeniu ilości wody, którą beton jest zdolny zaabsorbować, aż do całkowitego wypełnienia porów. Nasiąkliwość wagowa definiowana jest jako stosunek masy wody wnikającej do nasyconego materiału do jego masy suchej, co jest równoważne stosunkowi nasiąkliwości objętościowej do gęstości pozornej. Wyniki badań nasiąkliwości betonu zamieszczone są w tablicy 5.

Nasiąkliwość betonu z kruszywem z żużla pomiedziowego niezależnie od jego dodatku jest mniejsza od nasiąkliwości betonu wzorcowego, przy czym różnice w wynikach są niewielkie i mieszczą się w granicach błędów metody pomiarowej. Wg. normy PN-88/B-06250 *Beton zwykły* nasiąkliwość nie powinna być większa niż 5% w przypadku betonów narażonych bezpośrednio na działanie czynników atmosferycznych i 9% w przypadku betonów osłoniętych przed bezpośrednim działaniem czynników atmosferycznych. W obiektach mostowych nasiąkliwość betonu, przed zmianami w Rozporządzeniu (13) w ubiegłym roku, nie może przekraczać 5%. Nasiąkliwość betonu wywołuje wiele dyskusji dotyczących zarówno interpretacji wyników, jak i stawianych wymagań (14, 15). Wyniki badań (15) wykazały, że betony o nasiąkliwości mniejszej niż 4% nie przechodziły pozytywnie testu mrozoodporności. Z kolei betony, których nasiąkliwość wagowa znacznie przekraczała 5%, spełniały wymaganie mrozoodporności i wodoszczelności z dużym zapasem. Wyniki prezentowanych badań pokazują, że nawet dla nasiąkliwości bliskiej 6% można uzyskać stopień mrozoodporności F150. W obowiązującym Rozporządzeniu (13) zrezygnowano z wymagań nasiąkliwości wobec betonu w obiektach mostowych.

4. Podsumowanie i wnioski

Wszystkie wykonane badania pozwalają na pozytywna ocenę możliwości wykorzystania kruszywa z żużla pomiedziowego do produkcji betonu. Kruszywo to ma dobre właściwości i spełnia wymagania dla kruszyw stosowanych w betonie. Należy jednak dokonać głębszych analiz wpływu

hand, when the share of copper slag aggregate exceeds 50%, there is a noticeable decrease in compressive strength. The drop is in the range of 12-14%. The obtained results are confirmed in other studies (12). The optimal content of aggregate in concrete in terms of compressive strength is 40 - 50%. The results obtained show that the addition of copper slag aggregate, regardless of its quantity, can be successfully used in practice. On the basis of these research results it is possible to predict a further increase in the strength and physical properties of concrete, over time.

3.2. Freeze-thaw durability

The tests of concrete freeze-thaw durability were carried out using the standard method according to PN-88/B-06250 *Conventional concrete*. The tests were performed on 100x100x100mm cubic samples. According to this standard, the freeze-thaw durability of concrete for a given numer of cyles is achieved if the following conditions are met: the samples do not show cracks, scratches, scaling or chipping and the total mass of concrete losses in the form of damaged corners and edges, chipping, etc. does not exceed 5% of the mass of the samples before the start of the freeze/thaw cycles, and the loss of compression strength in relation to the strength of unfrozen samples is not higher than 20%. The number of freezing and thawing cycles was set to be 150, assuming that in practice, the investeigated concrete will be cyclically frozen and thawed in water and will be exposed to the de-icing salts. Table 4 presents the results of freeze-thaw durability tests of the tested concretes.

The results of the freeze-thaw durability tests presented in Table 4 show that concrete without and with copper slag aggregate has a very good resistance to cyclic frost action. All the concrete samples reached the F150 freeze-thaw durability level. The copper slag aggregate concrete is characterised by a slight decrease in compressive strength compared to the control concrete.

3.3. Absorbability

The concrete water absorption tests were performed in accordance with the PN-88/B-06250 standard. A concrete water absorption test consists in determining the amount of water that the concrete is capable of absorbing, until the accessible pores are completely filled. Water absorption by mass is defined as the ratio of the mass of water penetrated to saturated material to its dry matter, which is equivalent to the ratio of water absorption by volume to apparent density. The results of the concrete water absorption tests are shown in Table 5.

Tablica 4 / Table 4

WYNIKI BADAŃ MROZOODPORNOŚCI

FREEZE-THAW DURABILITY TESTING RESULTS

Skład betonu / Concrete composition	CS0	CS25	CS50	CS75	CS100
Ubytek masy / Loss of mass, %	0.12	0.00	0.00	0.09	0.02
Spadek wytrzymałości / Strength decrease, %	-0.1	1.4	4.0	2.5	1.6

właściwości kruszyw na mieszankę betonową. O ile zawartość kruszywa z żużla pomiedziowego nie ma znaczącego wpływu na zawartość powietrza w mieszance betonowej, to dużym problemem okazuje się być wpływ ilości kruszywa pomiedziowego na konsystencję mieszanki betonowej. Decydujący wpływ na konsystencję mieszanki betonowej ma wodożądność kruszywa z żużla pomiedziowego, dlatego koniecznym powinno być uwzględnienie wodożądności kruszywa z żużla pomiedziowego w procesie projektowania mieszanki betonowej. W przypadku zwiększania dodatku kruszywa pomiedziowego o mniejszej wodożądności niż kruszywo granitowe, w składzie mieszanki betonowej wzrasta stosunek w/c, co może spowodować zmniejszenie wytrzymałości betonu. Co istotne, kruszywo pomiedziowe nie wpływa na zwiększenie nasiąkliwości betonu, a nawet powoduje jej zmniejszenie. Wprawdzie spadki oscylują na poziomie maksymalnie około 3,3% i trudno jest określić, czy różnice nie wynikają jedynie z błędów powstałych przy zagęszczaniu próbek.

Podczas określania wytrzymałości na ściskanie odnotowano tendencję najpierw do wzrostu, a później do spadku wytrzymałości wraz ze wzrostem procentowej zawartości kruszywa z żużla pomiedziowego. Należałoby dokonać dodatkowych oznaczeń wytrzymałości na ściskanie dla innych zawartości kruszywa pomiedziowego, w celu zoptymalizowania jego ilości w mieszance betonowej.

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

– Konsystencja mieszanki betonowej zwiększa się wraz ze zwiększaniem dodatku kruszywa z żużla pomiedziowego.
– Wszystkie zaroby uzyskały projektowaną zawartość powietrza w mieszance betonowej.
– Zawartość powietrza zwiększa się wraz ze zwiększaniem dodatku kruszywa z żużla pomiedziowego.
– Wszystkie betony badane po 28 dniach spełniły wymagania co do wytrzymałości na ściskanie. Dla betonów o zawartości kruszywa z żużla pomiedziowego do 50% nastąpiło zwiększenie średniej wytrzymałości badanej serii. Dla betonów oznaczonych symbolem CS75 i CS100 odnotowano spadki na poziomie około 14% średniej wytrzymałości na ściskanie. Spadki te nie powodują jednak zmiany klasy betonu i nadal badane betony odpowiadają projektowanej klasie C30/37.
– Badane betony bez i z kruszywem z żużla pomiedziowego mają podobną nasiąkliwość.
– Beton wzorcowy posiada największą odporność na działanie mrozu. Podczas badania betonu CS0 uzyskano niewielki przyrost wytrzymałości po badaniu. Pozostałe betony spełniły wymagania normy i nie wykazały nadmiernego spadku wytrzymałości betonu na ściskanie po badaniu. Uzyskane wartości są zadowalające i nie stanowią zagrożenia dla trwałości betonu. Warto jednak zwrócić uwagę na to, iż betony CS75 i CS100 z dużą ilością kruszywa z żużla pomiedziowego nie wykazują

Tablica 5 / Table 5

WYNIKI BADAŃ NASIĄKLIWOŚCI

WATER ABSORPTION TESTING RESULTS

Skład betonu / Concrete composition	CS0	CS25	CS50	CS75	CS100
Nasiąkliwość / Absorbability, %	6.0	5.8	5.9	5.9	5.9

The water absorption of concrete, regardless the quantity of aggregate, is lower than that of the control concrete, with minor differences in results and within the error limits of the measuring method. According to PN-88/B-06250 *Conventional concrete* the water absorption of concrete should not exceed 5% in the case of concretes directly exposed to weather conditions and 9% in the case of concretes shielded from direct weather conditions. In bridges, concrete water absorption, before the amendments to the Regulation (13) announced last year, must not exceed 5%. The water absorption of concrete causes a lot of discussions concerning both the interpretation of the results and the requirements (14,15). The results of the tests (15) showed that concrete with water absorption below 4% did not pass the freeze-thaw durability test. In turn, concretes whose water absorption by mass significantly exceeded 5% met the requirement for freeze-thaw durability and water resistance with a large reserve. The results of the presented studies show that even for water absorption close to 6%, the degree of freeze-thaw durability of F150 can be obtained. In the current Regulation (13), the requirements for water absorption of concrete in bridges are abandoned.

4. Summary and conclusions

All the tests carried out allow for a positive assessment of the possibility of using copper slag aggregate for concrete production. This aggregate has good parameters and meets the requirements of aggregates used for concrete. However, the influence of the properties of aggregates on the concrete mix should be further analysed. While the content of copper slag aggregate does not have a significant impact on the air content of the concrete mix, the impact of the content of copper slag aggregate on the consistency of the concrete mix proves to be a major problem. The water demand of copper slag aggregate may be important for the consistency of the concrete mix, and it seems appropriate to consider the water demand of copper slag aggregate in the concrete mix design process. If there is an increase in the quantity of copper slag aggregate with a lower water demand than granite aggregate, the w/c ratio increases in the concrete mix, which may result in a decrease in concrete strength. An important feature is that copper slag aggregate does not increase the water absorption of concrete, it even reduces it. Although the drops are at a maximum of about 3.3% and it is difficult to determine if the differences are not due solely to errors in sample compacting.

When determining the compressive strength, there was a tendency initially for an increase and then for a decrease in strength with an increase in the percentage of copper slag aggregate. Additional

dużego spadku wytrzymałości na ściskanie po badaniu mrozoodporności.

– Gęstość betonu i mieszanki betonowej jest typowa dla betonów, w których stosuje się dodatek kruszywa o większej gęstości niż kruszywo użyte do projektowana wzorcowej mieszanki betonowej.
– Uzyskane wyniki badań kruszyw potwierdziły ich przydatność do zastosowania w betonie cementowym. Kruszywo z żużla pomiedziowego często wykazywało lepsze właściwości niż użyte w betonie wzorcowym kruszywo granitowe.

Literatura / References

1. Ł. Machniak, W. Kozioł W, Kruszywa alternatywne - baza zasobowa i kierunki wykorzystania w budownictwie, Kruszywa, **4/2014**, 28-33 (2014).

2. S. Góralczyk, D. Kukielska, Kruszywa pomiedziowe a naturalne - które lepsze?, Kruszywa, **1/2010**, 39-44 (2010).

3. A. Duszyński, W. Jasiński, A. Pryga-Szulc, Ocena i wykorzystanie kruszywa z pomiedziowego żużla granulowanego do mieszanek gruntowo-kruszywowych, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, **469**, 85-92 (2017).

4. P. Gembal, Kruszywa z żużla powstającego przy produkcji miedzi I możliwości ich wykorzystania w świetle wymagań ochrony środowiska, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, **27**, 85-94 (2016).

5. K.S-Jabri, A.S. Al-Saidy, R. Taha, Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties on cement mortar and concrete, Constr. Build. Mater. **25**, 933-938 (2011).

6. P.S. Ambily, C. Umarani, K. Ravisankar, P.P. Prem, B.H. Bharatkumar, N.R. Iyer, Studies on ultra-high performance concrete incorporating copper slag ad fine aggregate, Constr. Build. Mater., **77**, 233-240 (2015).

7. Anbarasan, uthaya Banu, Replacing river sand with granulated copper slag in cement, Int. J. Sci. Eng. Res. **7**(5), 1415-1423 (2016).

8. Z.K. Sambhaji, P.B. Autade. Effect of copper slag as a fine aggregate on properties of concrete, Int. Res. J. Eng. Techn. **3**(6), 410-414 (2016).

9. A. Shyam, A. Anwar, S.A. Ahmad, Experimental study on the behavior of copper slag as partial replacement of fine aggregate, Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Techn. **5** (IV), 1465-1474 (2017).

10. R.S. Edwin, M. De Schepper, E. Gruyaert, N. De Belie, Effect of secondary copper slag as cementitious material in ultra-high performance mortar, Constr. Build. Mater. **119**, 31-44 (2016).

11. C. Shi, J. Qian, High performance cementing materials from industrial slags - a review, Resour. Conserv. Recy. **29**, 195-207 (2000).

12. A.M. Rashad, A brief review on blast-furnace slag and copper slag as fine aggregate in mortar and concrete based on Portland cement, Reviews on Advanced Materials Science, **44**, 221-237 (2016).

13. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz. U. 2000 nr 63 poz. 735 wraz z późniejszymi zmianami).

14. A. Gołda, S. Kaszuba, Nasiąkliwość betonu - wymagania a metody badawcze, Cement Wapno Beton, **14**, 308-313 (2009).

15. P. Kamiński, Wpływ nasiąkliwości na trwałość betonu cementowego, Materiały Budowlane, **495**, 102-103 (2013).

compressive strength determinations should be carried out for other contents of the copper slag aggregate in order to optimise its quantity in the concrete mix.

The following conclusions can be drawn from the studies carried out:

– The consistency of the concrete mix increases with the increase of the percentage of the copper slag aggregate.
– All the batches met the designed air content in the concrete mix.
– The air content increases as the content of the copper slag aggregate increases.
– All the concretes tested after 28 days met the concrete strength requirements. For the concrete with an aggregate content of up to 50%, the average strength of the tested series increased. For the concretes marked CS75 and CS100, drops of about 14 % of the average compressive strength were recorded. However, these drops do not change the concrete class and the tested concrete still corresponds to the designed class of C30/37.
– The tested concrete without and with copper slag aggregate is characterised by a similar water absorption.
– The reference concrete has the best freeze-thaw durability. During testing of the CS0 concrete a small increase in strength was obtained after the test. The remaining concretes met the requirements of the standard and did not show an excessive decrease in the compressive strength of concrete after testing. The values obtained are satisfactory and do not pose a threat to the durability of the concrete. It is worth noting, however, that the CS75 and CS100 concretes with a large content of copper slag aggregate do not show a large decrease in compressive strength after freeze-thaw durability testing.
– The density of concrete and concrete mix is typical for concretes that use increasingly more aggregate with a higher density than the basic concrete mix designed.
– The obtained results of aggregate testing confirmed their suitability for use in cement concrete. The copper slag aggregate often showed better properties than the granite aggregate used in the basic batch.

dr inż. Robert Jurczak[1)*)]
ORCID: 0000-0003-3149-7497
mgr inż. Filip Szmatuła[2)]
ORCID: 0000-0001-9725-1540
dr inż. Tomasz Rudnicki[3)]
ORCID: 0000-0003-4522-2750
dr hab. inż. Jacek Korentz, prof. UZ[4)]
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, nasiąkliwości 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.

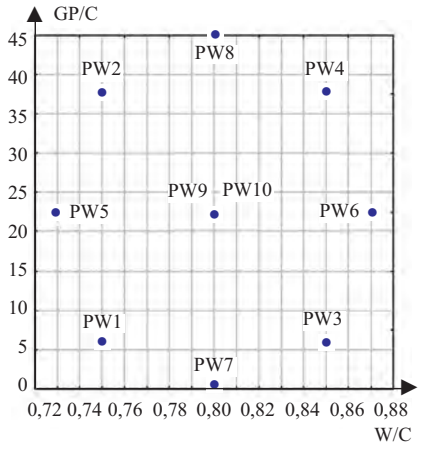
Dotychczas przeprowadzono wiele badań nad możliwością wykorzystania rozdrobnionej stłuczki szklanej jako częściowego zamiennika cementu i kruszywa w betonie [1, 3, 6, 8, 19]. Dotyczy to przede wszystkim betonów o niskiej klasie wytrzymałości (do C20/25). Ich wyniki [7] wskazują, że największy wzrost 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 zamiennika 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-rotalno-quasiuniformalny z dwukrotnym powtórzeniem doświadczenia w punkcie centralnym. Należy on do planów statycznych, zdeterminowanych 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 ÷ 0,87 i dodatek mie-

[1)] Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; Wydział Budownictwa i Architektury
[2)] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad Oddział Szczecin
[3)] Wojskowa Akademia Techniczna; Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
[4)] Uniwersytet Zielonogórski; Instytut Budownictwa
[*)] 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 ÷ 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, ±1 i ±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 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.

Tabela 1. Wartości kodowe, zmienne rzeczywiste
Table 1. List of coded and actual variables

Symbol mieszanki	Wartość kodowa		Zmienne rzeczywiste	
			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

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 g/cm^3, a gęstość cementu 3,102 g/cm^3. Rezultaty pomiarów powierzchni właściwej wg Blaine`a wskazują, że szkło mielone charakteryzuje się większą powierzchnią właściwą (4737 cm^2/g) niż cement (3728 cm^2/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. Zawartość piasku w stosie okruchowym wynosiła 50,6%. Jako kruszywa grubego użyto żwirów o uziarnieniu 2/8 mm i 8/16 mm.

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

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].

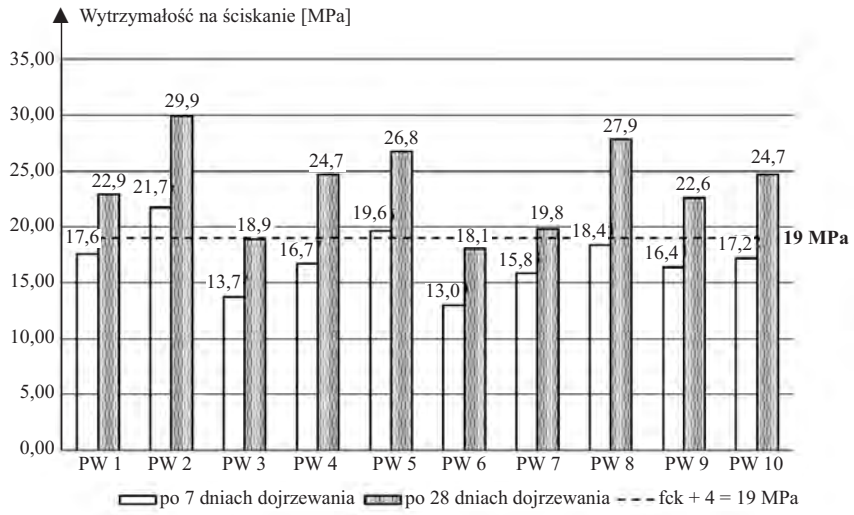
Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3.

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 [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 ÷ 5,1%, a gęstość betonu 2219 ÷ 2273 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 ±2°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

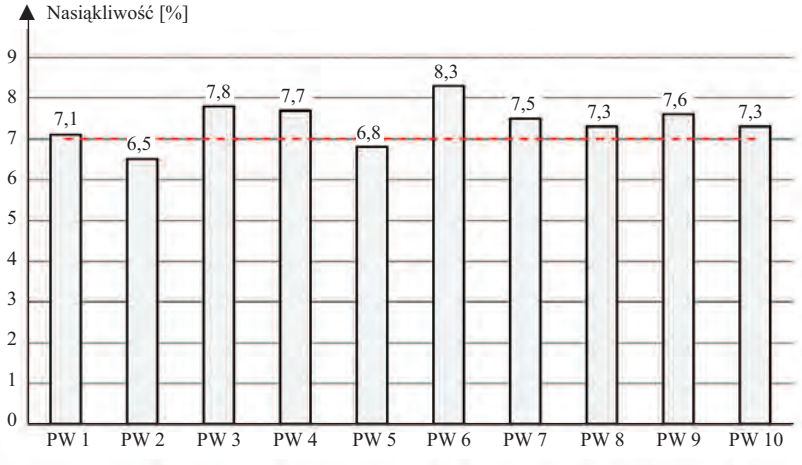
x_1 (W/C) i x_2 (GP/C) obok symbolu mieszanki betonowej. Uzyskano wytrzymałość na ściskanie 18,1 ÷ 29,9 MPa. Założoną klasę wytrzymałości na ściskanie C12/15 zgodnie z PN-EN 206 [15] po 28 dniach dojrzewania osiągnięto w przypadku siedmiu z dziewięciu badanych betonów. Największą wytrzymałością na ściskanie 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 sześcienne o krawędzi 100 mm, które po 28 dniach dojrzewania w wodzie wysuszono 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. Linią 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 zróżnicowanej 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 sześcienne 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/rozmrażania. Natomiast pozostałe sześć próbek pozostawiono w wodzie. Po upływie 25 i 100 cykli zamrażania/rozmrażania 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 niepoddanymi cyklom zamrażania. Ponadto na próbkach po cyklach zamrażania/rozmrażania 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 ΔG = 5%. Natomiast zmniejszenie wytrzymałości próbek poddanych cyklom zamrażania i rozmrażania, w porównaniu z próbkami świadkami, wyniosło 0,4 – 9,0% i było mniejsze od wartości dopuszczalnej ΔR = 20%. Z kolei w próbkach poddanych 100 cyklom zamrażania/rozmrażania 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.

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 mieszanki	Kryteria oceny mrozoodporności betonu wg PN-B-06250:1988 [16]		
	średni spadek wytrzymałości próbek po badaniu ΔR [%]	średni ubytek masy próbek po badaniu ΔG [%]	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 mieszanki	Kryteria oceny mrozoodporności betonu wg PN-B-06250:1988 [16]		
	średni spadek wytrzymałości próbek po badaniu ΔR [%]	średni ubytek masy próbek po badaniu ΔG [%]	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

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 zgładu. 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.

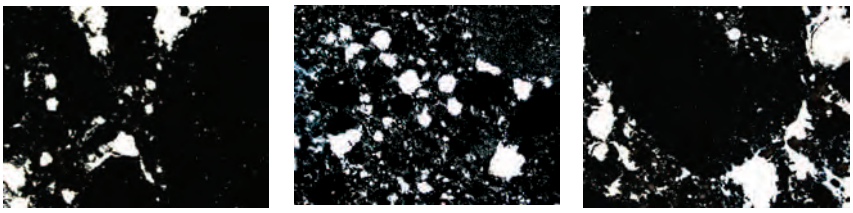
Betony oznaczone jako PW5, PW8 i PW9 zawierają dodatek szkła mielonego i charakteryzują się dużą wytrzymałością na ściskanie oraz odpornością na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Natomiast beton oznaczony jako PW7 jest betonem kontrolnym, który nie zawiera dodatku szkła mielonego. Spełnia minimalnie 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 α [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 wynosił 0,07 – 0,11 mm, natomiast ich powierzchnia właściwa 18,7 – 22,1 mm^{-1}. Otrzymano zróżnico-

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 (α). Na fotografii przedstawiono charakterystyczne obrazy mikrostruktury porów w badanych próbkach betonu.



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

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 statystycznej, 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 niestotne przy poziomie istotności 0,05. W przypadku dwóch wielkości wejściowych (W/C i GP/C) można wykonać wykres poziomicowy, 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 wytrzymałości 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:

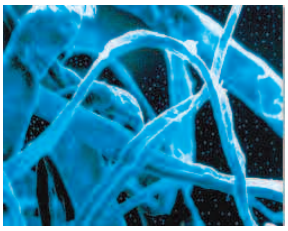
– zwiększa wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania o ok. 20% przy dodatku szkła mielonego w ilości 22,5% i o 40% przy dodatku w ilości 45%;

– 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 µm 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 odladzających.

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. Straszyńska. 2015. „Wpływ wysokiej temperatury na właściwości mechaniczne zapraw cementowych ze stłuczką 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_KRAWĘŻNIKI%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 (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.

applied sciences

MDPI

Article

Evaluation of the Possibility of Replacing Fly Ash with Glass Powder in Lower-Strength Concrete Mixes

Robert Jurczak [1,*] and Filip Szmatuła [2]

[1] Department of Road and Bridge Engineering, West Pomeranian University of Technology in Szczecin, 70-310 Szczecin, Poland
[2] General Directorate for National Roads and Motorways, 70-340 Szczecin, Poland; fszmatula@gddkia.gov.pl
* Correspondence: robert.jurczak@zut.edu.pl

Abstract: This article presents the results of research on the possibility of replacing fly ash with recycled waste glass in lower-strength concrete mixes. The results of testing concrete mixes containing either waste-glass powder or fly ash are presented in the article. A standard C12/15 concrete mix was chosen for the tests based on its common use for producing concrete for footings to support road kerbs and gutters along national roads in the Polish province of West Pomerania. In the first step of the testing procedure, reference mixes were prepared with 22.5% and 45% fly ash in relation to the content of cement. In the next step, mixes were prepared based on the same specification, except that glass powder was added in place of fly ash. The samples were then tested to determine the influence of waste-glass powder on the main properties of the prepared concrete mixes and on the performance of the concrete when hardened. All the samples were tested for 7 and 28-day compressive strength, water absorption, and freeze-thaw resistance in water. Next, the performance parameters of the samples containing waste-glass powder were compared to the reference mixes containing an equal amount of fly ash. The test results and their analysis allow us to conclude that mixes containing glass powder are not only equal to mixes containing fly ash, but even outperform them by a wide margin in terms of durability.

Keywords: waste-glass powder; fly ash; eco-efficient concrete; durability

check for updates

Citation: Jurczak, R.; Szmatuła, F. Evaluation of the Possibility of Replacing Fly Ash with Glass Powder in Lower-Strength Concrete Mixes. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 396. https://doi.org/10.3390/app11010396

Received: 1 December 2020
Accepted: 29 December 2020
Published: 4 January 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

According to a communication issued by the European Commission in December 2019, decarbonisation of the energy sector is one of the priorities of the European Union (EU) and is of key importance to achieving the associated climate objectives for the years 2030 and 2050 [1]. To this end, it is necessary to switch from coal to renewable energy sources. Also, it needs to be remembered that concrete to which no waste materials have been added is rare nowadays. Some of these additions (e.g., fly ash) are well known and have been in common use for years. It is clear that the deficit of fly ash, due to the closure of coal-fired power plants, will restrict the availability of this long-used component in the future [1]. Hence, the need for further research to look for alternative waste materials is imperative. An analysis of concrete-mix designs containing low-strength concrete used for road construction in the Polish province of West Pomerania revealed that fly ash is a frequently used addition. The authors believe that it can be replaced with, for instance, recycled, ground waste glass. According to statistical data [2], the average glass-recycling rate in Poland in 2017 was as low as 62.5%, compared to an average of 76.2% across the EU. Therefore, a large part of waste glass is still not being recycled. This means that the volume of waste glass being dumped into landfills increases annually by ca. half a million tonnes. It is also worth noting that reducing the impact of waste on the environment is of great importance in order to achieve the Green Deal goals. Depending on local conditions, after proper treatment (grinding), recycled waste glass, like fly ash, can be added to concrete at the production stage. This notably concerns waste glass that is unsuitable for recycling in

glass factories due to excessive dirt or colour variety. Such waste glass can obviously be reused if it is first subject to preprocessing, i.e., primarily cleaning, separation of coloured from clear glass, and crushing to the appropriate particle size. However, this is not an easy task because of the complicated process of separating and sorting [3]. Figure 1 shows typical waste glass preprocessing and precleaning.



(**a**) (**b**)

Figure 1. View of waste glass; raw (**a**) and precleaned (**b**).

Recent publications [4–13] indicate an increasing interest in waste glass and its application in concrete production. It is worth noting that use of glass as an addition to concrete can be limited due to the risk of alkali-silica reaction (ASR) [5–7,13]. Some studies have demonstrated that particles of glass greater than 1 mm make concrete more prone to ASR-induced damage [7,8]. Conversely, the addition of ground glass reduces or limits the adverse effect of expansive ASR products [13–15]. Other studies have demonstrated pozzolanic properties in concretes containing ground glass [14,16]. There are many research projects [4,7,9,10,17] concerning concrete of C20/25 strength class and higher, in which waste glass is most often seen as a partial substitute for cement, fine aggregate, or both of these ingredients at the same time. On the other hand, there are no studies treating waste glass in the same way as other concrete admixtures, i.e., as a filler and partial substitute for cement. While improving the performance of concrete, these additions can also reduce the amount of cement and lower the production cost. The research described in this article was inspired by the promising results of experiments conducted on concretes containing waste-glass powder, as presented in [18]. That being said, the authors have attempted to replace fly ash with recycled ground glass in low-strength-class mixes, i.e., up to C20/25. In road-construction applications, mixes of this type are used mainly for the casting of footings to support precast gutters laid along roads and kerbs. Currently, the only requirement for such mixes to be used on the national roads in Poland is that the concrete has a set minimum strength class. According to the requirements [19], such footings should be made from concrete with a compressive strength class of C12/15.

2. Materials and Methods

The subject of this research is the basic properties of concrete mixes and of hardened concrete with various additions. Two types of additions were used: siliceous fly ash (FA) and waste-glass powder (GP). The control mixes were produced with fly ash, which has been successfully used in concrete production for many years. From the observations made during quality control of works and materials used for the national roads in Poland, we knew that the content of fly ash in concretes can reach 50% by weight of cement (on the basis of the analysis of the specifications of C12/15 concrete used on national roads in the Polish province of West Pomerania). The amounts of fly ash added to the mix were 22.5% and 45% of the weight of cement (the percentage of cement remained unchanged). The design of the tested mixes was prepared on the basis of the control mix design, with

fly ash being replaced by waste-glass powder. Therefore, a total of four series of concrete samples were prepared. The designations of the respective mixes indicate the type and the percentage content of the addition in relation to the weight of cement. The water to cement ratio (W/C) of 0.8 was constant in all the concrete mixes, and so was the grain size distribution. It was assumed that strength class C12/15 concrete, according to EN 206 [20], would be obtained after 28 days of curing. Concrete mixes were prepared using general-purpose CEM I 42,5R Portland cement and natural aggregate, which was obtained by mixing washed sand with gravels of 2/8 mm and 8/16 mm grading. The mix specifications are given in Table 1 below.

Table 1. Mix specifications (the sources of the materials are given in parentheses).

Component (Amount per 1 m^3 (kg))	Mix Symbol			
	C_FA_22.5	C_FA_45.0	C_GP_22.5	C_GP_45.0
CEM I 42.5 R (Cemex)	200	200	200	200
Sand 0/2 (Bielinek)	900	900	900	900
Gravel 2/8 (Ognica)	430	430	430	430
Gravel 8/16 (Ognica)	450	450	450	450
Fly ash (Dolna Odra)	45	90	-	-
Waste-glass powder	-	-	45	90
Water	160	160	160	160
Water/cement ratio	0.8	0.8	0.8	0.8

The additions to concrete used in this research had different properties (Figure 2). Fly ash originated from coal combustion in the Dolna Odra power plant. Glass powder was obtained by crushing prebroken brown glass bottles in a laboratory crusher and grinding them in a Micro–Deval apparatus. The Blaine value of ground waste glass obtained in this way was 4737 cm^2/g, and the Blaine value of fly ash was 3983 cm^2/g. In this respect, fly ash is closer to cement (3728 cm^2/g). The highest density was obtained from cement (3.10 g/cm^3), and the lowest from fly ash (2.00 g/cm^3). The density of waste-glass powder was 2.52 g/cm^3. Fly ash and ground glass differ in terms of chemical composition. Brown glass powder contains more SiO_2 (ca. 70%) [13,16,17] than fly ash (ca. 50%) on average [16,21].



(**a**) (**b**)

Figure 2. Waste-glass powder (**a**) and fly ash (**b**) used for producing the tested mixes.

The consistency of the produced concrete mixes was evaluated using the slump cone test according to EN 12350-2 [22], their density was measured according to EN 12350-6 [23], and the total air content was determined with the pressure gauge method according to EN 12350-7 [24], ten minutes after mixing the components. Samples for compressive strength

testing according to EN 12390-3 [25] and for freeze-thaw durability testing according to PN-B-06250:1988 [26] were moulded in the next step.

A compressive strength test was performed in compliance with EN 12390-3 [25]. Six 150 × 150 × 150 mm concrete cubes were made from each test series. Before the tests, the density of the concrete was determined according to EN-12390-7 [27]. Since low-temperature performance requirements were not specified for concrete used for the casting of footings under gutters and kerbs on national roads, the experiments were carried out as if they were used for freeze-thaw resistance classes F25 and F100. Freeze-thaw resistance was tested according to PN-B-06250:1988 [26], using the ordinary method. For dozens of years, this has been the main method used in Poland for rating the freeze-thaw resistance of concrete. Two sets of 100 × 100 × 100 mm cubes were prepared from each concrete series. Each set included 12 specimens, and 24 specimens were prepared from each mix; these were used to determine the freeze-thaw durability after 25 and 100 cycles, respectively. After demoulding, the specimens were cured by immersion in water at a temperature of 20 ± 2 °C. In the next step, the samples were weighed, and then six specimens of each mix were subjected to the predefined number of freeze-thaw cycles while the other six remained immersed in water. After cycling, all samples were reweighed and subjected to a compressive strength test, both those exposed to freezing and those left in water. A visual assessment of the samples was conducted prior to the test. Water absorption capacity by weight after 28 days of curing, according to PN-B-06250:1988 [26] and using the standard-sample 100 × 100 × 100 mm cubes, was also determined.

3. Results and Discussion

3.1. Fresh Properties

The test results obtained on the tested concrete mixes are given in Table 2 and Figure 3.

Table 2. Properties of the tested concrete mixes.

Parameter	Unit	Mix Symbol			
		C_FA_22.5	C_FA_45.0	C_GP_22.5	C_GP_45.0
Slump Cone	mm	10	10	30	30
Consistency class	-	S1	S1	S1	S1
Density	kg/m^3	2280	2270	2250	2270
Air content	%	3.9	4.1	4.8	5.1



(**a**) (**b**) (**c**) (**d**)

Figure 3. Slump cone test results: C_FA_22.5 (**a**), C_FA_45.0 (**b**), C_GP_22.5 (**c**) and C_GP_45.0 (**d**).

The tested concrete mixes gained the assumed initial consistency S1 (slump less than 50 mm). The concrete mix with the addition of waste-glass powder was characterised by greater fluidity (greater slump) than the mix containing fly ash. This may be due to a lower water demand of glass and the smooth surface of glass particles. The amount of air was the

highest in the mixes containing ground glass and the lowest in the mixes containing fly ash. Replacing fly ash with ground glass increased the total air content in the mix (by ca. 1%).

3.2. Hardened Properties

3.2.1. Compressive Strength

The density of concrete samples oscillated between 2270 kg/m^3 and 2300 kg/m^3. The density of the tested mixes was in the range typical of regular concrete, namely 2000–2600 kg/m^3. Compressive strength was determined after 7 and 28 days of curing. Compressive strength was calculated based on the actual dimensions of the samples. The average values are represented in Figure 4. The minimum required compressive strength of C12/15 concrete is shown with a dashed line (19.0 MPa). The values obtained after 7 and 28 days of curing are represented by plain and crosshatched bars, respectively.

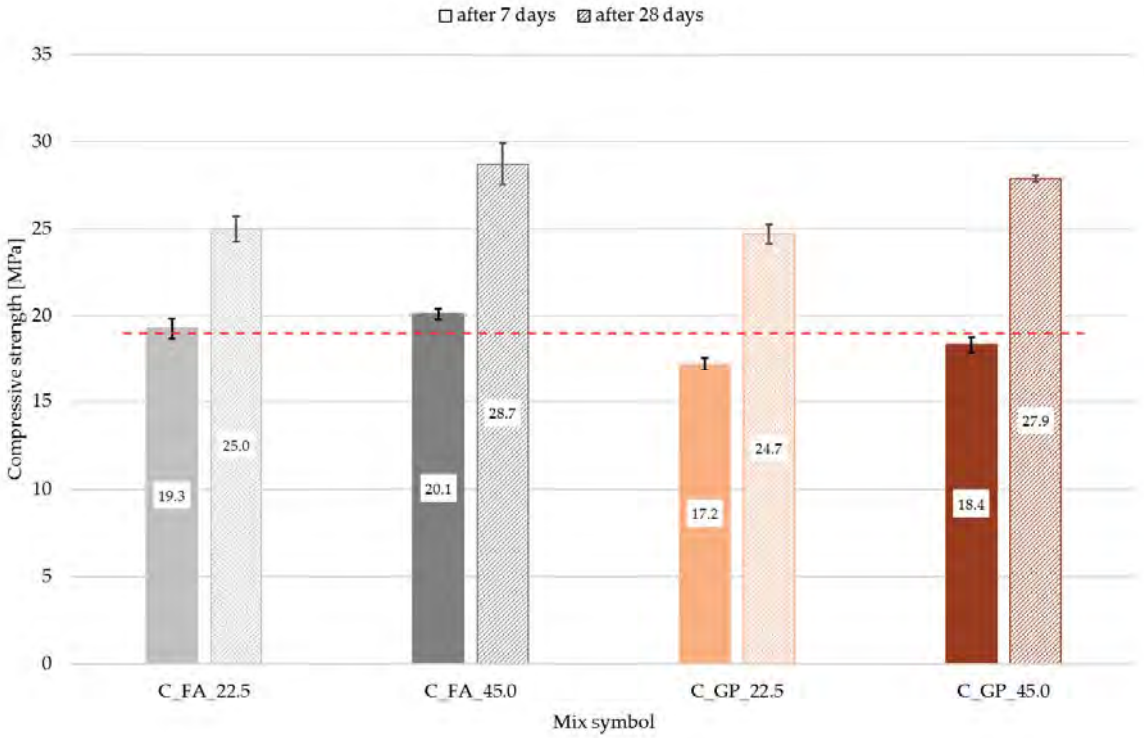


Figure 4. Compressive strength of the tested concrete mixes showing standard deviation.

After 28 days of curing, all the tested concrete mixes achieved the minimum compressive strength class. The mix containing fly ash obtained the highest compressive strength in all the tests. However, the range in compressive strength, compared to concrete with ground glass, of up to 2.9% was considered insignificant.

When comparing the compressive strength after 28 days and after 7 days of curing, we observed the greatest increase in the case of concrete with the addition of glass powder (by 43–52% depending on the quantity of glass added to the mix). For mixes with fly ash, compressive strength increased in this period by 30% to 40%. The compressive strength increased with the quantity of additions.

3.2.2. Water Absorption

The water absorption of the tested mixes was determined in accordance with the Polish standard PN-B-06250:1988 [26]. Four specimens were prepared from each concrete series. The average values are represented in Figure 5.

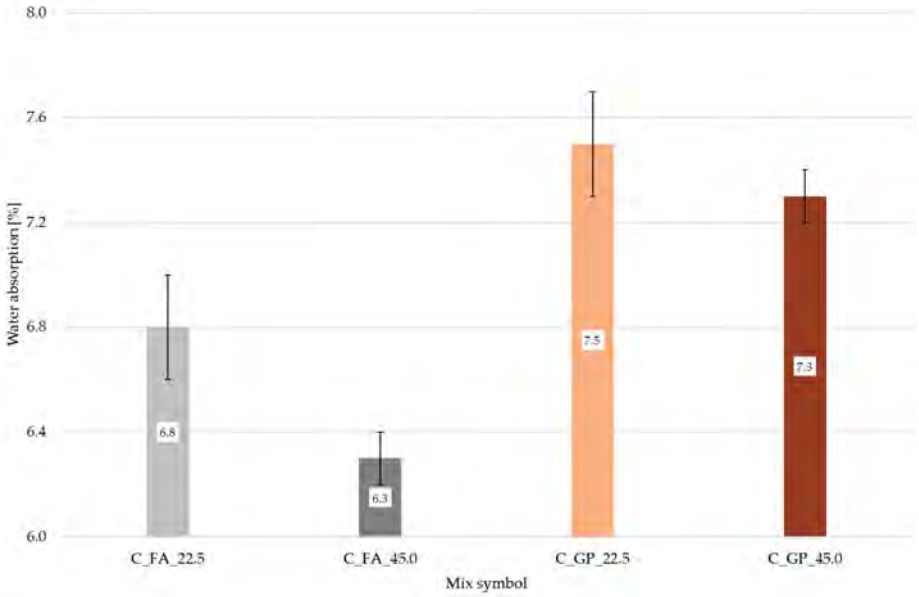


Figure 5. Water absorption of the tested mixes showing standard deviation.

Mixes containing fly ash showed the lowest water absorption of all the tested mixes after 28 days of curing. It was observed that the higher the fly-ash content in concrete, the lower its absorption capacity. The absorption values of mixes containing waste-glass powder were at a similar level of ca. 7.4%.

3.2.3. Freeze-Thaw Resistance

According to the frost-resistance criteria of the Polish standard PN-B-06250:1988 [26], for concrete to be rated as "frost resistant", the weight variation (ΔG) must not exceed 5%, the loss of compressive strength (ΔR) must not be higher than 20%, and cracks must not occur during the test. The results of the durability tests (decrease in strength) of the mixes, including their resistance to freeze-thaw cycles for frost resistance of F25 and F100, are shown in the Figure 6. The dashed line indicates an average decrease of compressive strength of 20%. The decrease of strength after 25 and 100 freeze-thaw cycles is represented by plain and crosshatched bars, respectively.

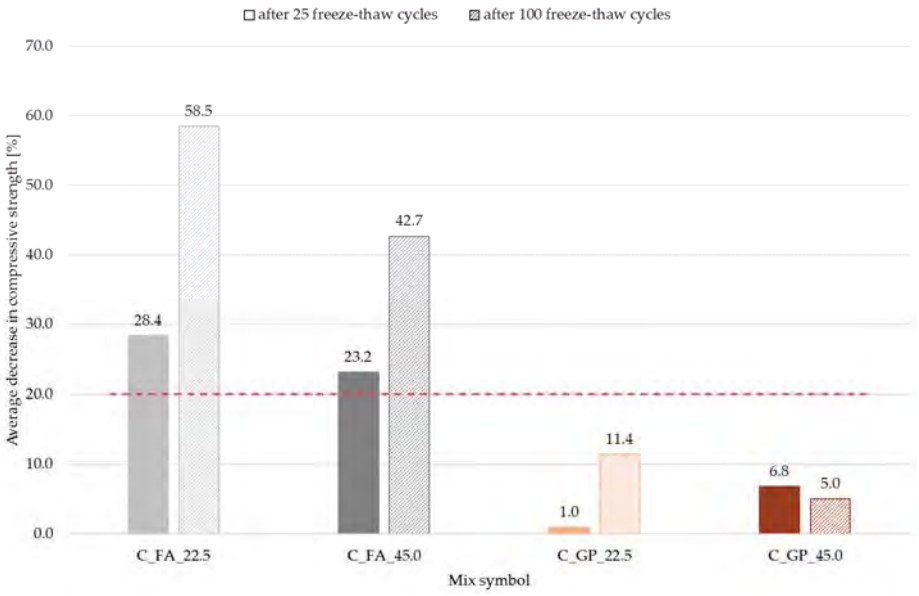


Figure 6. Decrease in compressive strength of mixes subjected to either 25 or 100 freeze-thaw cycles.

An analysis of the results of the frost-resistance test revealed a big difference between the behaviour of concrete with fly ash and with glass powder when subjected to subzero temperatures. The effect of waste-glass powder on the durability of concrete after several freeze-thaw cycles was clearly noticeable. Based on the analysis of test results represented in Figure 6, it can be stated that only mixes with the addition of glass powder satisfied the requirements of either the F25 or F100 class, as per PN-B-06250:1988 [26]. The compressive strength of concrete with the addition of glass powder decreased by 1% to 11.4% on average, depending on the number of freeze-thaw cycles, which was far below the allowed limit of 20%. The weight change did not exceed 0.1% (weight loss after 25 freeze-thaw cycles) and 0.2% (weight increase after 100 freeze-thaw cycles), which was less than the allowed limit of $\Delta G = 5\%$. Figure 6 shows that the average decrease in compressive strength after 28 days of curing (C_GP_45.0) was smaller than the average decrease in compressive strength after 7 days of curing. In the authors' opinion, considering the uncertainty of the measurements (expanded uncertainty of 3%), this difference was not significant. The results for mixes containing fly ash admixture turned out to be diametrically different. Upon completion of freeze-thaw cycling, significant damage to the surface and edges of the samples was observed. One of every six specimens of fly-ash concrete mixes (C_FA_22.5) was destroyed in the tests (Figure 7a). An average decrease of compressive strength for these concretes exceeded the 20% value allowed by the norm [26] and, depending on the number of cycles applied, fell within a range between 23% and 59%. The weight change did not exceed 0.6% (weight increase after 25 freeze-thaw cycles) and 1.5% (weight increase after 100 freeze-thaw cycles). Therefore, the tested concretes with the addition of fly ash should be considered nonresistant to frost action.



(**a**) (**b**)

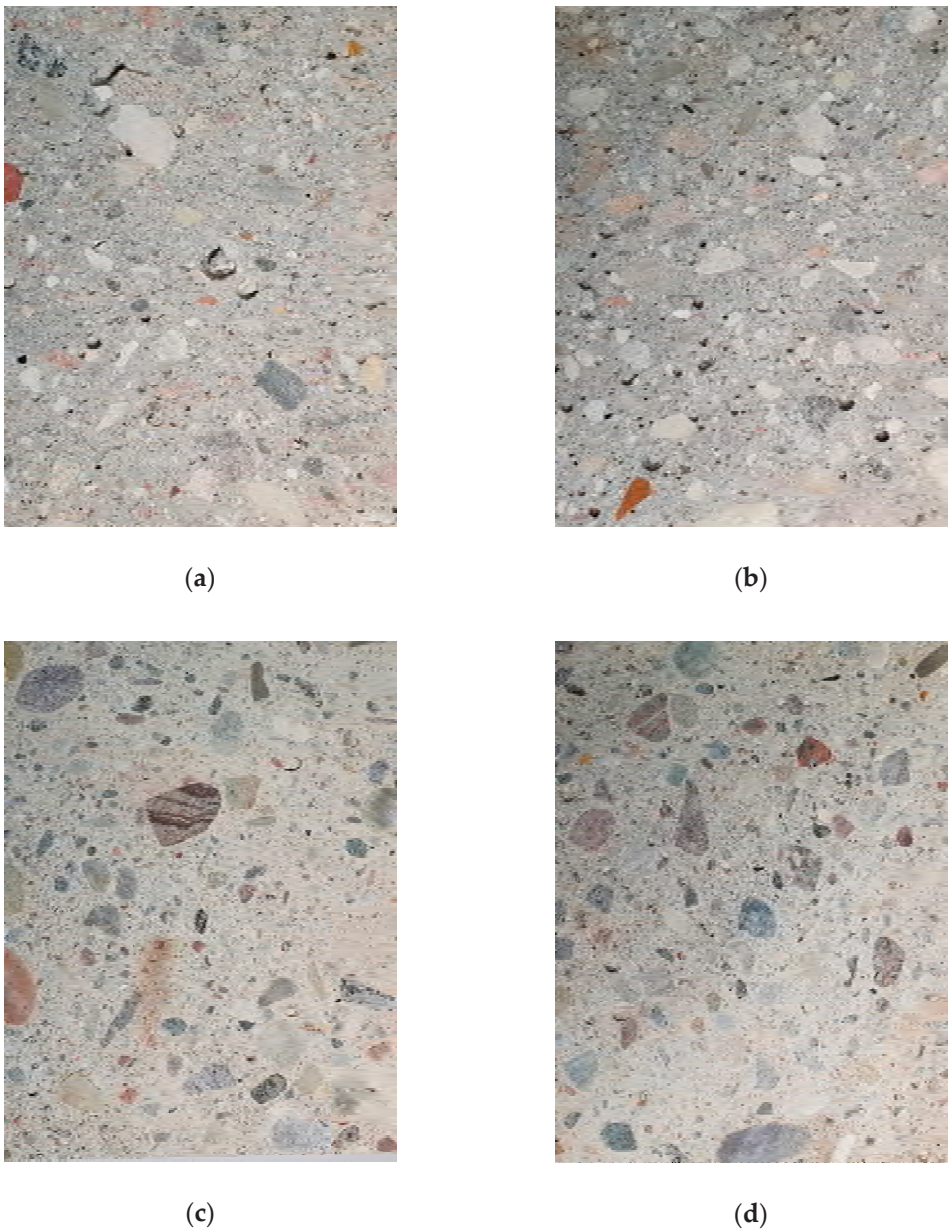
Figure 7. Specimens of concrete: C_FA_22.5 (**a**) and C_GP_22.5 (**b**) after 100 freeze-thaw cycles.

The greatest reduction in compressive strength (of 28%) was observed for the mix containing 22.5% fly ash. In turn, the concrete containing 22.5% glass powder showed the smallest (1%) change in compressive strength. Furthermore, compressive strength changed more significantly in the case of the concrete mixes subjected to a greater number of freeze-thaw cycles (100). Concrete with 45% fly ash was characterized by the greatest reduction of compressive strength (by 43%) and concrete with 45% of glass powder showed the smallest reduction in compressive strength (of 5%).

The results were subjected to a statistical analysis in the Statistica software [28]. Strength calculations showed that the difference between the average compressive strengths (also referred to as the average decrease of compressive strength) between fly ash concrete and concrete containing glass powder was significant only in the case of the decrease of compressive strength in the freeze-thaw resistance test.

3.2.4. Visual Assessment of Concrete Samples

The pictures below shows the surfaces of the tested concrete samples after cutting (Figure 8).



(**a**) (**b**)

(**c**) (**d**)

Figure 8. View of the concrete samples after cutting: C_FA_22.5 (**a**) C_FA_45.0, (**b**) C_GP_22.5, (**c**) and C_GP_45.0 (**d**).

Different microstructures were observed after cutting the concrete samples. On the surface of concrete samples with the addition of fly ash, a large number of pores with a diameter greater than 1 mm was noticed (Figure 8a,b). The analysis of the surface images of

concrete samples showed that the structure of concrete with the addition of glass powder was more compact with lessened porosity (Figure 8c,d).

4. Conclusions

This article presents the results of experimental determinations of the properties of C12/15 concrete mixes and hardened concretes containing either fly ash or glass powder. Based on the performed research and analyses, the following can be concluded:

- Concrete mixes with glass powder are characterized by a greater liquidity and a greater total air content.
- Irrespective of the type and quantity of the added material, the concretes have comparable compressive strength classes falling in the range between 24.7 MPa and 28.7 MPa. All the tested mixes met the compressive strength requirements for C12/15 class concrete and can be used for casting footings to support road kerbs and gutters along national roads in Poland.
- The greatest differences between the mixes concerned durability. As a result of exposure to freezing temperatures, the control mixes with fly ash suffered considerable damage. Replacement of fly ash with waste-glass powder in C12/15 strength concrete result in concretes satisfying the freeze-thaw resistance criteria for classes F25 and F100.

In light of the test results obtained for the reference concretes (with fly ash addition), glass powder was shown to have no adverse effect on the compressive strength of concrete, did not significantly increase its water absorption, and significantly improved the resistance to frost attack. The above conclusions should be deemed preliminary and can be used as a basis for deriving a plan for further research. To begin with, the authors plan to verify ground waste glass added to concrete in terms of reactivity. Furthermore, for a more accurate picture, we also plan to carry out studies concerning the particle size and shape distribution of both fly ash and ground waste glass. Taking into consideration current efforts aimed at curbing CO_2 emissions and material consumption, the results obtained in this study justify the need for further research on the use of recycled glass powder as a concrete admixture.

Author Contributions: Conceptualization, R.J. and F.S.; preparation of samples for testing, R.J. and F.S.; testing of samples concrete F.S.; formal analysis, R.J.; writing—original draft preparation, R.J.; writing—review and editing, R.J. and F.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Communication from the European Commission. The European Green Deal. Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN (accessed on 5 October 2020).
2. FEVE Recycling Statistics 2017. Available online: https://feve.org/about-glass/statistics/ (accessed on 5 October 2020).
3. Sordoń-Kulibaba, B. Zagospodarowanie odpadów szkła i opakowań szklanych. *Szkło Ceram.* **2008**, *59*, 15–17.
4. Rek, W.J.; Kopytko, M.; Opłocka, E. Wpływ stłuczki szklanej z recyklingu na wytrzymałość i trwałość betonu. *Inżynieria Bud.* **2019**, *9*, 429–434.
5. Małek, M.; Łasica, W.; Jackowski, M.; Kadela, M. Effect of Waste Glass Addition as a Replacement for Fine Aggregate on Properties of Mortar. *Materials* **2020**, *13*, 3189. [CrossRef] [PubMed]
6. Czapik, P. Microstructure and Degradation of Mortar Containing Waste Glass Aggregate as Evaluated by Various Microscopic Techniques. *Materials* **2020**, *13*, 2186. [CrossRef] [PubMed]
7. Sičáková, A.; Špak, M. The Effect of a High Amount of Micro-Fillers on the Long-Term Properties of Concrete. *Materials* **2019**, *12*, 3421. [CrossRef] [PubMed]

8. Pavl, T. The Utilization of Recycled Materials for Concrete and Cement Production—A Review. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2018**, *442*, 012014. [CrossRef]
9. Patel, D.; Tiwari, R.P.; Shrivastava, R.; Yadav, R.K. Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *199*, 406–415. [CrossRef]
10. Jain, K.L.; Sancheti, G.; Gupta, L.K. Durability performance of waste granite and glass powder added concrete. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *252*, 119075. [CrossRef]
11. Skoczylas, K.; Rucińska, T. Influence of Grain Shape of Waste Glass Aggregate on the Properties of Cement Mortar. *J. Ecol. Eng.* **2020**, *21*, 148–159. [CrossRef]
12. Horszczaruk, E.; Brzozowski, P. Mechanical Properties of Mortars Containing Waste Glass Powder. *Period. Polytech. Archit.* **2019**, *50*, 30–34. [CrossRef]
13. Wang, Y.; Cao, Y.; Zhang, P.; Ma, Y. Effective utilization of Waste Glass as Cementitious Powder and Construction Sand in Mortar. *Materials* **2020**, *13*, 707. [CrossRef] [PubMed]
14. Deja, J.; Gołek, Ł.; Kołodziej, Ł. Zastosowanie stłuczki szklanej w produkcji spoiw. *Cement Wapno Beton* **2011**, *6*, 349–354.
15. Kamali, M.; Ghahremaninezhad, A. Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *98*, 407–416. [CrossRef]
16. Gołek, Ł.; Kapeluszna, E. Zastosowanie stłuczki szklanej i popiołów fluidalnych do produkcji spoiw. *Świat Szkła* **2013**, *5*, 42–44.
17. Najduchowska, M.; Pabiś, E.; Rolka, G.; Baran, T. Właściwości betonu z zastosowaniem stłuczki szklanej. In *Monografie Technologii Betonu, Proceedings of Dni Betonu, Wisła, Polska, 10–12 October 2016*; Stowarzyszenie Producentów Cementu: Kraków, Polska, 2016.
18. Jurczak, R.; Szmatuła, F.; Rudnicki, T.; Korentz, J. Effect of Ground Waste Glass Addition on the Strength and Durability of Low Strength Concrete Mixes. *Materials* **2021**, *14*, 190. [CrossRef]
19. Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych. D-08.01.01 Krawężniki betonowe. GDDKiA. 2019. Available online: https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumenty-techniczne_8162/WWiORB/punkt%208/D-08.01.01_KRAWĘŻNIKI%20BETONOWE_V01.pdf (accessed on 5 October 2020).
20. *EN 206:2014: Concrete—Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity*; CEN: Brussels, Belgium, 2014.
21. Łagosz, A.; Gajewski, R. Wpływ popiołu lotnego na trwałość betonu z cementami żużlowymi. *Bud. Technol. Archit.* **2008**, *1*, 60–65.
22. *EN 12350-2:2019: Testing Fresh Concrete—Part 2: Slump-test*; CEN: Brussels, Belgium, 2019.
23. *EN 12350-6:2019: Testing Fresh Concrete—Part 6: Density*; CEN: Brussels, Belgium, 2019.
24. *EN 12350-7:2019: Testing Fresh Concrete—Part 7: Air Content—Pressure Methods*; CEN: Brussels, Belgium, 2019.
25. *EN 12390-3:2019: Testing Hardened Concrete—Part 3: Compressive Strength of Test Specimens*; CEN: Brussels, Belgium, 2019.
26. *PN-B-06250:1988: Beton Zwykły*; PKN: Warsaw, Poland, 1988.
27. *EN 12390-7:2019: Testing hardened Concrete—Part 7: Density of Hardened Concrete*; CEN: Brussels, Belgium, 2019.
28. TIBCO Software Inc. *Statistica, Version 13*; TIBCO Software Inc.: Palo Alto, CA, USA, 2017.

materials

MDPI

Article

Effect of Ground Waste Glass Addition on the Strength and Durability of Low Strength Concrete Mixes

Robert Jurczak [1], Filip Szmatuła [2], Tomasz Rudnicki [3,*] and Jacek Korentz [4]

[1] Department of Road and Bridge Engineering, West Pomeranian University of Technology in Szczecin, 70-310 Szczecin, Poland; robert.jurczak@zut.edu.pl
[2] General Directorate for National Roads and Motorways, 70-340 Szczecin, Poland; fszmatula@gddkia.gov.pl
[3] Faculty of Civil Engineering and Geodesy, Military University of Technology in Warsaw, 2 Gen. S. Kaliskiego St., 01-476 Warsaw, Poland
[4] Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, University of Zielona Góra, 65-417 Zielona Góra, Poland; j.korentz@ib.uz.zgora.pl
* Correspondence: tomasz.rudnicki@wat.edu.pl

Abstract: By recycling used glass containers, we are able to recover and reuse their valuable properties, which is a way to preserve the relevant natural resources and lessen environmental burdens. For example, recycled waste glass (in the form of powder) can be used in the production of concrete. This article analyses the effect of waste glass addition on the properties of C12/15, which is used, for example, as concrete bedding material to support road drainage gutters and kerbs. Ground waste glass was used as a filler in the mix, i.e., without decreasing the amount of cement. Brown glass collected as municipal solid waste was used in this research. The research comprised an experiment prepared on the basis of the central composite design. The independent variables included water/cement ratio and the amount of glass powder, expressed as the glass to cement ratio by weight. The adopted research program mainly included the definition of the concrete compressive strength, water absorption and freeze–thaw resistance after 25 and 100 cycles of freezing and thawing. For selected systems, the characteristics of air voids in hardened concrete were also defined. The beneficial effect of ground waste glass added as a filler to the concrete mixture on the strength and durability of concrete was confirmed by the obtained test results.

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

check for updates

Citation: Jurczak, R.; Szmatuła, F.; Rudnicki, T.; Korentz, J. Effect of Ground Waste Glass Addition on the Strength and Durability of Low Strength Concrete Mixes. *Materials* **2021**, *14*, 190. https://doi.org/10.3390/ma14010190

Received: 20 November 2020
Accepted: 29 December 2020
Published: 2 January 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

The aspects related to the reuse of waste materials, such as waste glass, in the field of construction have become an increasingly widely explored subject of scholarly articles. Although the amount of waste glass collected and recycled in the EU increases year by year, as demonstrated by the most recent data [1], there are very wide variations between the member states themselves. With an over 95% glass recycling rate in Sweden, Slovenia, and Belgium; in other countries, such as Greece and Hungary, there is great room for improvement in this respect. In Poland, the average glass recycling rate in 2017 was 62.5%, i.e., it was 13.7% lower than the value of the whole of the European Union. This means that waste glass and used glass containers are, in a majority, reused in the production of brand-new products, i.e., utilised in the most efficient way. On the other hand, ca. 37.5% of this waste is not recycled at all, i.e., it is sent directly to landfill.

Currently, waste glass is used as a raw material for the production of glass fibres used in production of thermal and sound insulation panels, mats, and lagging. For example, a very fine-grained waste glass powder is used to produce expanded glass beads added to wall coatings and mortars. Another waste glass material, namely waste flat glass, is used for the production of glass microspheres [2].

Numerous studies have been conducted on the possibility of using finely ground waste glass as a partial replacement for cement in concrete. A smaller glass particle size led

to a higher compressive strength in concrete and compared to fly ash concrete, concrete containing ground glass exhibited a higher strength at both early and late ages [3]. The compressive strength test results indicated that recycled glass mortar and concrete gave better strength compared to control samples. A 20% replacement of cement with waste glass was found to be convincing considering the cost and the environment [4]. Test results [5] indicate that use of glass powder in concrete has improved the performance of concrete in strength. The addition of glass powder in the amount of 15% results in the highest increase in compression, bending and tensile strength. Many years of observations after the walls and panels were made have shown a continuous improvement in the mechanical performance and resistance chloride-ion penetration of the glass powder concrete due to its pozzolanic reactivity. The water absorption and porosity were also decreased when using glass powder [6]. The incorporation of glass as a cement replacement or even as aggregate can decrease the alkali silica reaction (ASR) effects and its efficiency is related with the replacement ratio [7]. Concrete with cement replaced by 15% and 30% glass powder exhibited the highest strength increase and correspondingly the lowest porosity [8]. However, the high-volume glass powder concrete retained distinct resistance against water and chloride ingress, due to the reduction in pore size and connectivity. Other research [9] has shown that the use of recycled glass powder (RGP) as cement replacement is feasible for a replacement level up to 10%. However, long term curing and lower particle size distribution are mandatory for the successful use of RGP with higher replacement levels without compromising the strength. Test results [10] reflect a slow and continuous pozzolanic activity of the glass powder in mixtures with enough free water available. The improvement in the mechanical strength and durability of the cementitious materials modified with glass powders can be attributed to microstructure improvement arising from the pozzolanic property of the glass powders [11].

The results of studies on the impact of glass granulate as a substitute for natural aggregate in concrete are known. The addition of 25% and 50% of crushed waste glass sand promotes a significant improvement in strength, and the optimum glass content should be 25% for the production of sustainable eco-concrete [12]. With the addition of 5, 10, 15 to 20 wt.% glass aggregate, the increase in compressive, flexural, and split tensile strength of mortar with glass sand aggregate compared to the reference mix ranging from about 11% to 29%, 3% to 14% and 20% to 23%, respectively [13]. Replacement of natural aggregate with glass aggregate results in a significant increase in concrete strength [12,13], but not in all cases. In contrast, the test results [14] showed that the greater the addition of recycled glass aggregates produced of exploded lighting materials, the less advantageous the features of the concrete obtained with its participation are. The addition of waste glass as a partial substitute to fine aggregate has been reported to improve the mechanical properties of heat resistant cementitious mortars [15]. Additionally, based on a review of several scholarly papers [16–22], we can state that waste glass can be used, depending on its fineness, as a partial replacement to fine aggregate or cement; in the latter case, playing a role of a binder.

Researchers expect that fly ash and slag may soon become scarce due to their increasing reuse in the production of energy, similarly to other renewable sources. It is, therefore, justified to search for alternative fine-grained materials that could be successfully used in the production of concrete. Ground waste glass can be an option of choice in these circumstances. Other than fly ash or slag, this additive is not a combustion by-product. Moreover, due to the high cost of segregating small-size waste glass items (advanced sorting systems are needed in the process), coloured waste glass seems to be a very promising option in this application. This applies in particular to lower strength classes of concrete (i.e., up to C20/25), in which various types of waste/by-products coming from various industries have been successfully used for a number of years. The primary applications of this material include bedding under road gutters and kerbs and as a road-base material. It is related to a very wide range of infrastructural investments, which are and will be implemented in Poland for many years.

In Poland, road engineers use in the design process the so-called catalogues of standard constructions [23,24], which specify the materials that should preferably be applied for the lower courses of pavement. Portland cement concrete (PCC) is used solely as a pavement surfacing material. It is not specified for other courses of the pavement structure, such as road-base course. That said, PCC could in theory be used as road-base material in pavements of bespoke design. One also cannot find a construction appropriate for bus lay-by pavements in the above-mentioned catalogues. In Poland, the minimum strength is the one and only requirement that bedding concrete for road items must satisfy according to the requirements of the relevant construction and testing codes issued by General Directorate for National Roads and Motorways (shortened to GDDKiA) [25]. The detailed design requirements applicable to PCC road-bases are given in the Polish standard no. PN-S-96014:1997 [26], which is still in force in Poland. The criteria specified in this standard for road-base concrete include compressive strength as required for C12/15 concrete and water absorption not greater than 7%. Freeze–thaw resistance of concrete is also checked after twenty-five freeze–thaw cycles according to the standard method described in the standard [26]. The test is passed if the average compressive strength of specimens subjected to cyclic freezing and thawing is not smaller than 80% of the average compressive strength of non-tested specimens.

The review of the mix specifications of concrete types currently used on the national roads in the West Pomerania province of Poland showed that C12/15 and C16/20 are the prevalent types of concrete mixes. C12/15 concrete is used to support precast gutters at the edges of road pavements and kerbs around the roundabout overrun areas and traversable roundabout islands. C16/20 concrete, in turn, is used much less frequently, predominantly as the base course of pavements in bus lay-by areas. This gives a chance to utilise in this way at least a part of the waste glass sent to landfill. With a vast majority of the research project carried out so far dealing with the use of waste glass as a partial substitute to cement and fine aggregate, the authors have decided to investigate the use ground waste glass as a filler, without decreasing the content of cement in the concrete mixture.

2. Materials and Methods

As part of the project, an experiment plan was generated in the statistical program Statistica (the "Design of Experiments" module) [27]. A central composite design was chosen with two replications of the central point. It belongs to static, determined and poly-section plans. The layout of points in the experiment plan has been presented in Figure 1.

The tests were carried out on concrete mixes based on natural aggregate for five intermediate input values x_1 (water to cement ratio, shortened to W/C) and x_2 (glass powder to cement ratio, shortened to GP/C). The input values were W/C, in the range of 0.73–0.87 and GP/C, which was in the range of 0% to 45%. Nine series of specimens were produced, differentiated by the concrete mix composition. The studies were carried out for five intermediate values of input data x_1 and x_2 determined for standardised values equal to 0, ± 1 and ± 1.414. The standardised values resulting from the adopted plan were calculated into real values of variables. The coded variables and the compositions of the respective series of specimens in the adopted experiment plan are compiled in Table 1. As one can notice, the plan layouts (the concrete mix marked as PW9 and PW10) present the same combinations of input data values. Repeating the experiment for these combinations is necessary for the purpose of determining the error resulting from the output data measurement uncertainty. The composition of the reference mix without any glass added, in the experiment plan designated PW7, was adopted on the basis of the analysis of the specifications of C12/15 concrete used on national roads in the West Pomerania province of Poland.

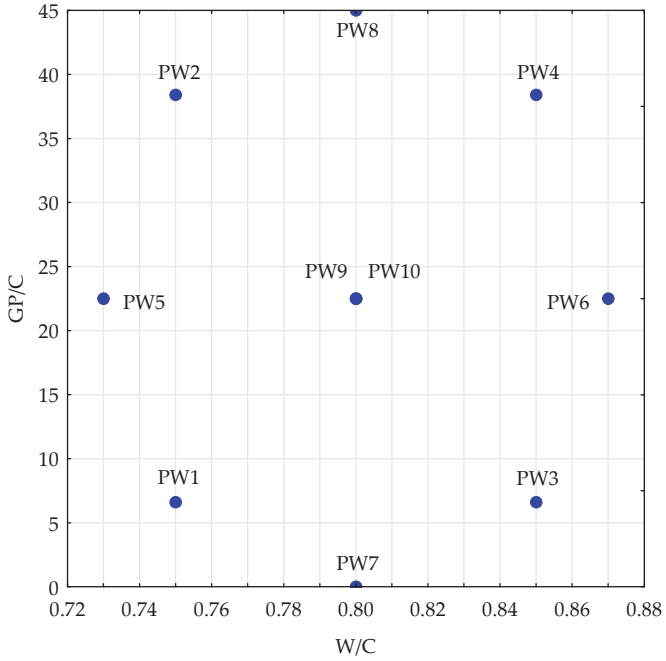


Figure 1. Applied central composite design.

Table 1. List of coded and actual variables.

Mix Symbol	Coded Variables		Actual Variables	
			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

The constants were the type and class of cement, fine and coarse aggregate types, method of adding the ingredients, mixing method and time and method of compacting fresh concrete, curing time, and curing conditions and, last but not least, the test apparatus.

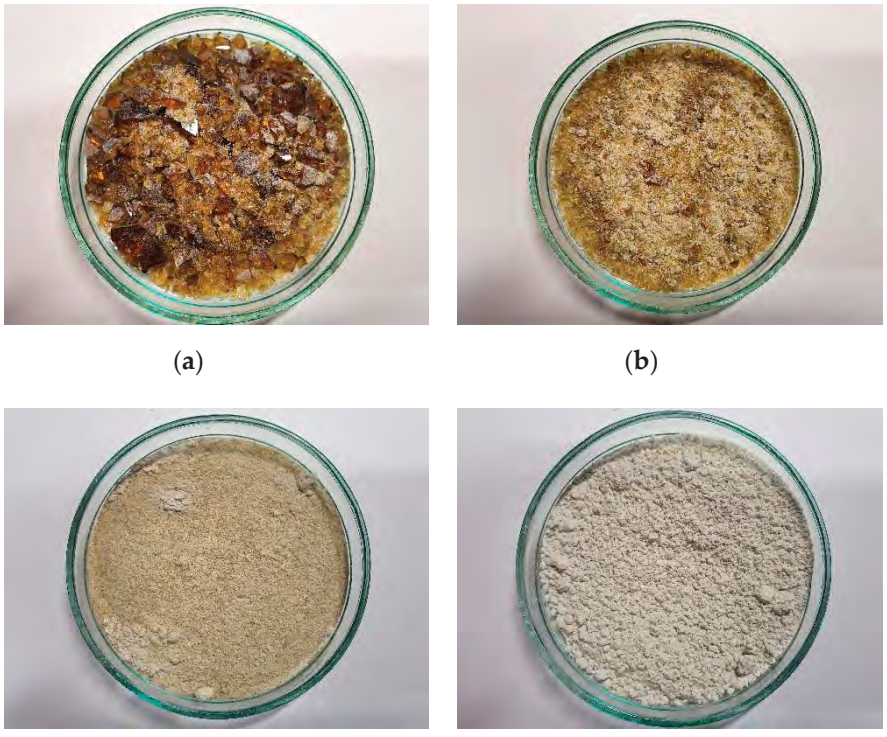
Brown glass was chosen for this experimental research. It was cleaned and dried and then crushed and powdered (Figure 2). The initial crushing took place in a laboratory crusher and mill (Figure 2a–c). For final crushing, the micro-Deval apparatus was used (Figure 2d). The density of ground glass used for the test was 2.515 g/cm^3 and the density of cement was 3.102 g/cm^3. The Blain air permeability test was used to measure the specific surface area and ground glass was found to have a greater specific surface than cement (4737 cm^2/g compared to 3728 cm^2/g).

The compositions of prepared mixes are given in Table 2. A change in the water/cement ratio and a different amount of the addition of glass powder result in the fact that the recipes presented in the table allow for obtaining concrete mixes of various volumes.

Table 2. Specifications of the tested concrete mixes.

Mix Symbol	The Composition of the Concrete Mix According to the Adopted Plan [kg]					
	CEM I 42.5 R	Sand 0/2	Gravel 2/8	Gravel 8/16	Water	Glass Powder
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

The mix included 200 kg of Portland cement CEM I 42.5R manufactured by Cemex Gdynia, in which cement clinker was the only cementitious material (this eliminated the need to introduce additional variables). Fine-grained aggregate was 0/2 mm sand from Bielinek sand and gravel pit. The percentage of sand contained in the aggregate mix was 50.6%. Additionally, 2/8 mm and 8/16 mm gravels from Ognica pit were used as coarse aggregate.



(**a**) (**b**)

(**c**) (**d**)

Figure 2. Crushing stages: (**a**) initially crushed; (**b**) crushed in crusher; (**c**) crushed in crusher and ground in mill; (**d**) crushed in crusher, ground in mill, and powdered in micro-Deval apparatus.

3. Results and Discussion

3.1. Fresh Properties

The prepared concrete mixes were tested for the basic properties including:

- Consistency, determined with the slump cone test according to EN 12350-2 [28];
- Air content determined with the pressure gauge method according to EN 12350-7 [29];

- Density according to EN 12350-6 [30].

The results of concrete mix tests are given in Table 3 below.

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

Mix Symbol	W/C Ratio	GP/C Ratio	Slump Cone [mm]	Air Content, [%]	Density, [kg/m^3]
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

The consistency and air content were measured once, 15 minutes after water was added to the mix. Two of the tested mixes, namely PW4 and PW6, attained S2 consistency and the other ones fell in the consistency class S1. The total air content in the mixes ranged from 4.0–5.1%. The density of concrete mix oscillated between 2219 kg/m^3 and 2273 kg/m^3. Taking into consideration the measurement uncertainties, one can conclude that the addition of glass powder with an identical water/cement ratio does not impact the concrete mix air content and its consistency. The differences in the results of air content and concrete mix density are comparable and smaller than the measurement uncertainty.

3.2. Hardened Properties

3.2.1. Compressive Strength

Out of each concrete mix, a series of six specimens was created for determining the compressive strength. To determine the strengths of the specimens, compression testing machines (walter + bai, Löhningen, Switzerland) were used. Compressive strength was determined after 7 and 28 days of curing the specimens in water at the temperature of 20 ± 2 °C. The tests were carried out on three 150 mm cubes, according to the procedure described in EN 12390-3 [31]. The Figure 3 represents the obtained average compressive strengths. The dashed line indicates the minimum compressive strength required to classify in C12/15 class. Additionally, values x_1 (W/C) and x_2 (GP/C) are given in parentheses next to the concrete mix symbol.

The compressive strength results varied strongly, in the range of 18.1–29.9 MPa. The assumed compressive strength to satisfy the requirement of the C12/15 strength class according to EN 206 after curing for 28 days [32] was obtained for seven out of nine tested concrete mixes. The highest compressive strength after curing for 28 days (in the range of 26.8–29.9 MPa) was obtained by the mixes with the lowest values of W/C ratio and different proportions of waste glass added during production (mixes designated PW2, PW5 and PW8). It was higher than the compressive strength of the reference mix without ground glass (designated PW7) by 7.0–10.1 MPa (35.4–51.0%). The lowest values of compressive strength, after curing for 28 days, were obtained by mixes with the highest W/C ratio (designated PW3 and PW6), which failed to satisfy the criteria of the adopted strength class. Furthermore, the strength parameters of five tested mixes (PW2, PW4, PW5, PW8 and PW10) satisfied the C16/20 strength class criteria. It is also worth noting that PW2 and PW5 mixes attained the assumed strength class after only 7 days of curing. Referring to the provisions of the applicable Polish code [25] relating to concrete mixes for casting strip footings, only two mixes, viz. PW3 and PW6, failed to attain the minimum compressive strength. The remaining mixes are therefore suitable as a bedding material to support road gutters and kerbs.

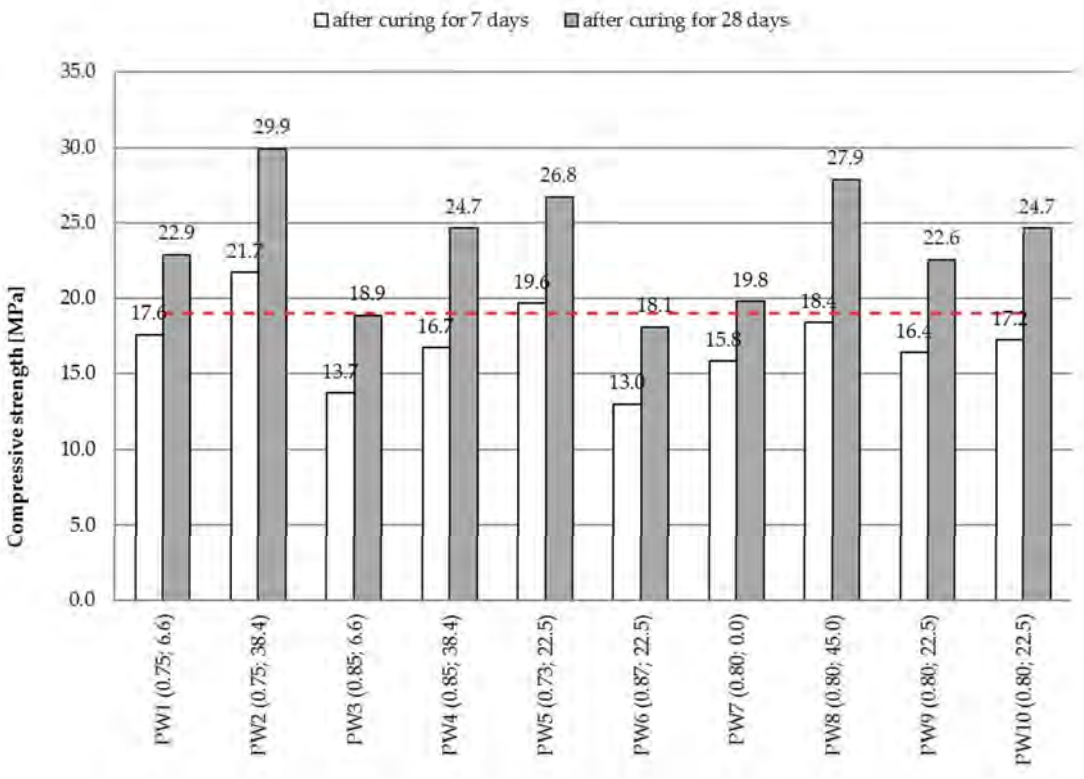


Figure 3. Compressive strength of concrete after curing for 7 and 28 days.

From the analysis of the 7 day and 28 day compressive strength values, it follows that the increase in strength of the control concrete mix by 25.1% was much smaller than that obtained for the mix containing waste glass. The highest levels of strength increase, viz. from 30.5% to 51.9%, were noted for the mixes containing waste glass. As we have observed, with the same water-to-cement ratio, the higher the proportion of waste glass, the higher the increase in the compressive strength of the mix.

3.2.2. Water Absorption

Water absorption of the tested mixes was determined according to PN-B-06250:1988 [33]. Four 100 mm cubes were prepared for each mix specification, which after 28 days of immersion curing were dried to constant weight at a temperature of 105 °C. Then, the specimens were immersed in water, left to fully saturate and weighed once again. The average water absorption values are represented in the Figure 4. The dashed line indicates the limit according to [26].

According to the obtained water absorption test results, the absorption criterion, as per PN-S-96014:1997 [26], was satisfied by only two of the tested concrete mixes, namely PW2 and PW5. These values were in the range of 6.5–8.3% (7.4% being the average value). The lowest and highest values were obtained for PW2 and PW6 mixes, respectively. As it can be seen, mixes with the same value of the water/cement ratio, viz. 0.8 mixes no. PW7–PW10, and with different proportions of waste glass have comparable absorption capacity by weight. On the other hand, different absorption capacities were obtained for mixes designated PW1 and PW2 containing 6.6% and 38.4% of waste glass powder, respectively, despite the same (yet lower than in the case of mixes PW7–PW10) W/C ratio, which in the case under analysis was 0.75.

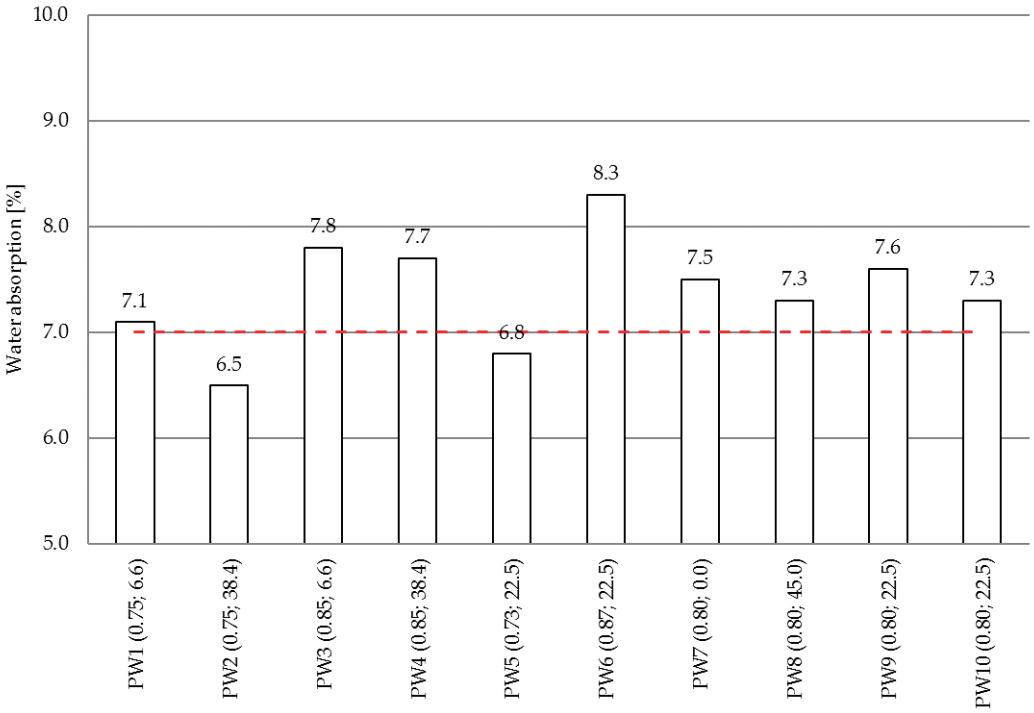


Figure 4. Water absorption of the tested concrete mixes.

3.2.3. Freeze–Thaw Resistance after Saturation in Water

Freeze–thaw resistance of concrete was tested according to PN-B-06250:1988 [33] with the ordinary method, procedures no. F25 and F100. Twenty-four 100 mm cubes were moulded from each of the tested mixes. The produced specimens were then immersed in water for 28 days. Next, six specimens of each mix type were weighed and subjected to twenty-five freeze–thaw cycles. The remaining six specimens were left immersed in water. After a specific number of freeze–thaw cycles (25 and 100), the specimens were weighed and assessed visually. The compressive strength of all the specimens was determined as the last step of the test procedure. The results of the freeze–thaw resistance after saturation in water are given in Tables 4 and 5 below.

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

Mix Symbol	Freeze–Thaw Resistance Criteria According to PN-B-06250:1988 [33]		
	Average Decrease of Strength ΔR, %	Weight Variation after Freeze–Thaw Cycles ΔG, %	Appearance, Presence of Cracks
PW1	5.9	0.04	none
PW2	2.7	0.03	none
PW3	1.0	0.05	none
PW4	9.0	0.01	none
PW5	2.0	0.04	none
PW6	4.9	0.05	none
PW7	2.3	0.08	none
PW8	6.8	0.02	none
PW9	1.5	0.06	none
PW10	0.4	0.05	none

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

Mix Symbol	Freeze–Thaw Resistance Criteria According to PN-B-06250:1988 [33]		
	Average Decrease of Strength ΔR, %	Weight Variation after Freeze–Thaw Cycles ΔG, %	Appearance, Presence of Cracks
PW1	8.6	−0.21	hairline cracks
PW2	5.6	−0.04	none
PW3	22.5	−0.12	scaling and spalling
PW4	45.0	−0.92	partial and full depth cracking
PW5	3.0	−0.06	none
PW6	24.6	−0.33	cracking
PW7	24.1	-0.35	scaling and cracking
PW8	5.0	−0.15	hairline cracks
PW9	12.3	−0.18	spalling
PW10	10.5	−0.17	spalling

Based on the frost resistance criteria of PN-B-06250:1988 [33], the weight variation must not exceed 5% and the loss of compressive strength must not be higher than 20%, as compared to the specimens made of the same mix that were not subjected to cyclic freezing and thawing. Moreover, the specimens must not show cracking after the test.

The freeze–thaw resistance criteria were satisfied by all the mixes subjected to a standard procedure [33] comprising twenty-five freeze–thaw cycles. Distress of the surfaces or edges was not observed in any of the tested specimens. The weight loss did not exceed 0.1%, which is less than the allowable limit of ΔG = 5%. The decrease in strength after freezing and thawing cycles was in the range of 0.4–9.0% (as compared to the non-tested specimens), which is below the allowable limit of ΔR = 20%. This means that the tested mixes satisfy and exceed the F25 rating criteria by a wide margin. Based solely on the results obtained on the specimens subjected to twenty-five freeze–thaw cycles, we can conclude that all the tested concrete mixes satisfy the rating criteria of [26].

Other than in the case of 25 freeze–thaw cycles, 100 cycles caused an average increase in the specimen weight by 0.3%. Furthermore, the higher number of cycles caused a greater decrease in the compressive strength, namely by 3.0 to 45.0%. Only two mixes showed no observable distress: PW2 and PW5 (Figure 5b). By satisfying the average decrease in strength and weight variation criteria, the specimens meet the F100 frost resistance rating criteria. Cracking was noted only in the specimens made from the PW4 mix. In addition, an average decrease in strength by a staggering 45% was obtained for this mix, which was the greatest value among all the test results. Average drops in the compressive strength in excess of 20% were obtained for the mixes designated PW3 (Figure 5a), PW6 and PW7. This being so, they failed to satisfy the F100 class rating criteria. In the case of PW1, PW8, PW9 (Figure 5c) and PW10 mixes, spalling and hairline cracking was observed, despite smaller, i.e., below 20% average drops of compressive strengths. The average drop of strength obtained for the reference mix designated PW7 exceeded the allowable limit defined by the F100 rating criteria. Considering the intended application on the tested mixes, it must be noted that a high freeze–thaw resistance was not expected of them. That said, when specifying freeze–thaw durable mixes care must be taken to specify an appropriate proportion of ground waste glass added to the mix.

3.2.4. Air Void Analysis

Defining the characteristics of air voids in hardened concrete was carried out in accordance with the EN 480-11:2008 standard [34]. Specimens for the research-dimensions 150 mm × 100 mm × 20 mm were cut out of cubes (side length: 150 mm) formed in a laboratory. Subsequently, the specimens were subjected to the process of sanding, polishing, and contrasting in order to achieve a smooth surface of the polished section. The measurement of the characteristics of the air voids was performed applying the microscope

method with the use of the computer automatic image analysis system Nikon SMZ1270 Navitar. Four concretes marked as PW5, PW7, PW8 and PW9 were selected for the studies of the characteristics of air voids (Figure 6). The concretes (PW7, PW8 and PW9) were selected for the purpose of assessing the impact of the addition of glass powder (with an identical water/cement ratio equal to 0.80) on their air void characteristics. An attempt was also made to compare the spacing of the air voids in hardened concrete with an identical average amount of glass powder in concrete (22.5% in reference to the mass of the cement) but with a different water/cement ratio. As a result of the above, the concrete marked as PW5 was selected.



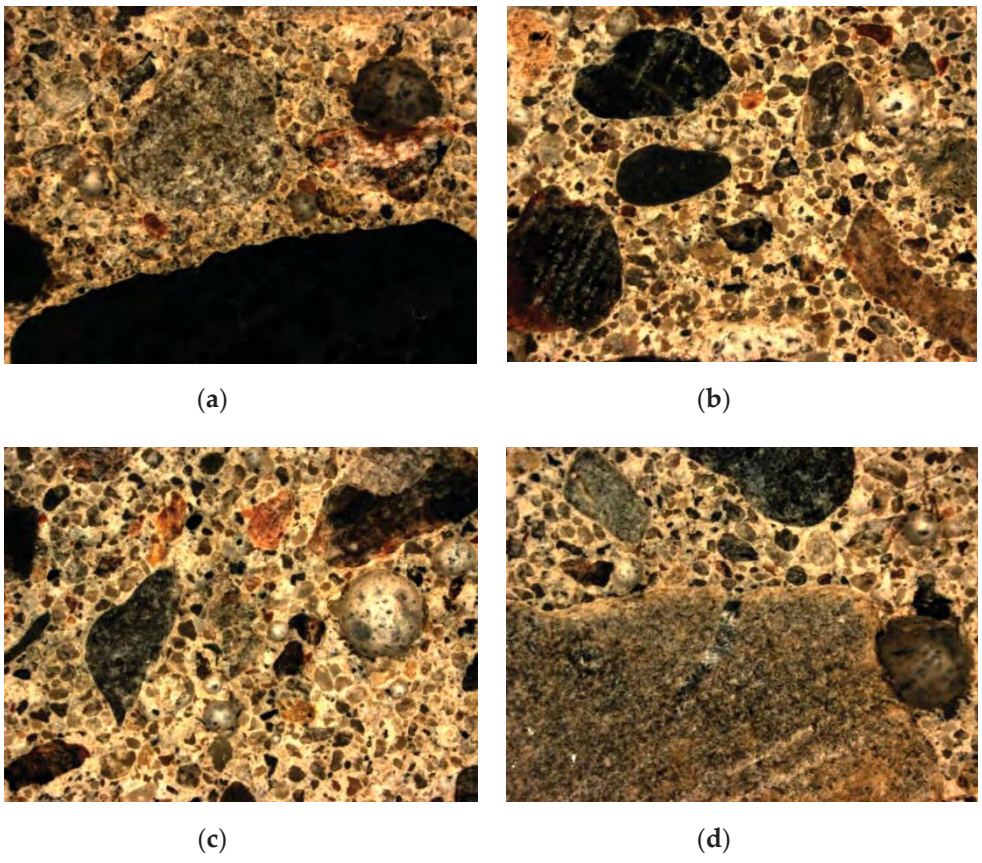
(**a**) (**b**) (**c**)

Figure 5. Specimens of concrete: PW3 (**a**), PW5 (**b**), and PW9 (**c**) after 100 freeze–thaw cycles.

Concretes marked as PW5, PW8 and PW9 contain the addition of glass powder and demonstrate significant compressive strength and resistance to cyclical freezing and thawing. Concrete marked as PW7, in turn, is control concrete, which does not include the addition of glass powder. It meets the minimum requirements associated with the concrete strength class, but it does not meet the requirement of the F100 degree of freeze–thaw resistance. The most frequently adopted parameter for the assessment of the freeze–thaw resistance of concretes is the air void spacing factor L (the average distance to the nearest air void), which should not be larger than 0.2 mm. Another, also important parameter is the minimum air content in air voids smaller than 0.3 mm, marked as A_{300}, which should equal at least 1.5%. The data obtained as a result of the automatic analysis of the image from four specimens of the surface from each spacing of concrete air voids selected for the analysis allowed for calculating the total content of air (A), the specific surface area of the air voids (α), the air void spacing factor (L) and the content of micro-air-voids with a diameter lower than 0.3 mm (A_{300}). The obtained average values of the analysed parameters, defined according to the standard [35], in particular specimens are presented in Table 6. Unfortunately, for the control concrete (PW7), it was not possible to prepare specimens for the analysis of the air void structure. The specimens were falling apart during cutting and sanding. The authors did not obtain the appropriate surface of the prepared polished section, which is a necessary condition of obtaining correct results of the measurement of the air void characteristics. The reason for that may be the higher number of air voids, including ones of big sizes. The reason for the occurrence of big air voids was the hindered compacting of the concrete mix.

While analysing the achieved results of marking the characteristics of the air void spacing in selected concretes (PW5, PW8 and PW9), it is possible to conclude that they meet the requirements in reference to concrete utilized in XF conditions. According to the standard [32], concretes in the XF exposure classes are exposed to the aggressive impact of freezing/thawing without de-icing agents (XF1) or with de-icing agents (XF2–XF4). The air void spacing factor in concrete was between 0.07 and 0.11 mm, whereas the specific surface area of the air voids was from 18.7 to 22.1 mm^{-1}. Differentiated results were obtained for the total air content, unlike the results of the analysis of air content in the concrete mix, defined using the pressure method (from 5.8% to 13.2%). The total air content in the hardened concrete fits within the range of 10.9–18.2%. Such a high air content is probably

the result of the insufficient compacting of the specimens. The highest value of the air void spacing factor (L) and the lowest content of micro-air-voids (A_{300}) were demonstrated by the concrete marked as PW8, which included the highest amount of the addition of glass powder. In the case of an identical water/cement ratio equal to 0.80, one can notice that in concrete PW8, along with the increase in the amount of glass powder (from 22.5% to 45.0%), there was a decrease in the total content of air and micro-air-voids (A_{300}); whereas in concrete marked as PW5, with the water/cement ratio lower than in concrete PW9 (but with identical content of the addition of glass powder), one observes lower total content of air and of air voids with a diameter lower than 0.3 mm and a lower specific surface area of the air voids (α). Figure 7 presents the characteristic images of the microstructure of air voids in the analysed concrete specimens. As a result of colouring the surface of the polished section black and of filling all the air voids with zinc paste, the contrast image required in automatic analysis was obtained.



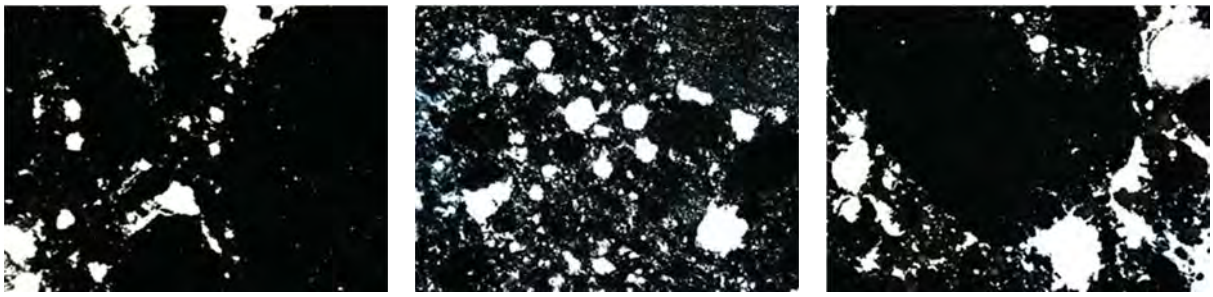
(**a**) (**b**)

(**c**) (**d**)

Figure 6. The image of the tested concrete samples after cutting: (**a**) PW5, (**b**) PW7, (**c**) PW8 and (**d**) PW9.

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

Parameter	Unit	PW5	PW8	PW9
Total air content, A	%	16.58	10.85	18.20
Specific surface of the air void system, α	mm^{-1}	18.73	21.93	22.13
Spacing factor, L	mm	0.09	0.11	0.07
Micro air-void content, A_{300}	%	3.37	2.30	4.31



(**a**) (**b**) (**c**)

Figure 7. The image of the microstructure of air voids in the analysed concrete specimens: (**a**) PW5, (**b**) PW8, and (**c**) PW9 (air voids marked with white). The air void spacing meets the requirements.

For the purpose of designating the spacing of air voids, a calculation model was adopted, which assumes the occurrence of air voids of a certain determined diameter. It is a transitional model between the actual state and Powers' model. The measured chords are classified into appropriate length ranges, and subsequently, the number of chords in a given length class is determined and multiplied by the volume of a single air void with the diameter equal to the top limit of a given class. The size distribution of air voids recorded during the study conducted on four specimens has been presented in Figure 6.

As was demonstrated in the distribution of air content as a function of the air void diameter (Figure 8) in hardened concrete (PW5, PW8 and PW9), there are both air voids of desired dimensions of 10–100 μm, as well as much bigger air voids exceeding 0.5–1.0 mm, which do not have a significant impact on the improvement of freeze–thaw resistance.

3.3. The Effect of Glass Powder on the Compressive Strength and Durability of Concrete

The results were subjected to a statistical analysis in the software program Statistica [27]. First, the Barlett's test was performed to check the equality of variances. The equality of variances was confirmed at the significance level of 0.05, based on the obtained F-statistics (critical significance level p). The variance equality hypothesis was also found to be true through the Levene and Brown–Forsyth tests. The analysis of data also included checking the significance of the effect of input data (W/C and GP/C) on the values of the output variable (28 day compressive strength). The Fisher–Snedecor test was employed for this. The values of significance levels p below 0.05 indicate a significant effect of the water–cement ratio and the amount of added glass powder (in relation to the weight of cement) on the 28 day compressive strength of the tested mixes. In the further part of the statistical analysis, a model representing the effect of independent variables on the 28 day compressive strength was built on the basis of the output data of the experiment carried out according to the central composite design. A linear-quadratic model with two-way interactions was adopted in the first place. Insignificant components were then left out one by one through the analysis of the results in Statistica [27]. Finally, the factors with the greatest effect on the strength of the tested mixes were established, namely the ratio of waste glass and cement by weight followed by the water–cement ratio.

The regression function was verified on the standardised values $\hat{x}_i$ (independent variables: W/C and GP/C) for the following approximating Equation (1):

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

The constants A_i (regression coefficient) of this equation were obtained with the Gauss–Newton method of estimation. Using the t-Student test factors, A_2, A_4 and A_5 were excluded as insignificant at the significance level of 0.05. The correlation factor R was 0.96. In the case of two input data values (W/C and GP/C), it is possible to develop the contour diagram that presents the response surface of the object of studies. The values of the predicted 28 day compressive strength are given in Figure 9. Blue dots have been

marked on the surface of the contour diagram. These are measured values introduced into the plan.

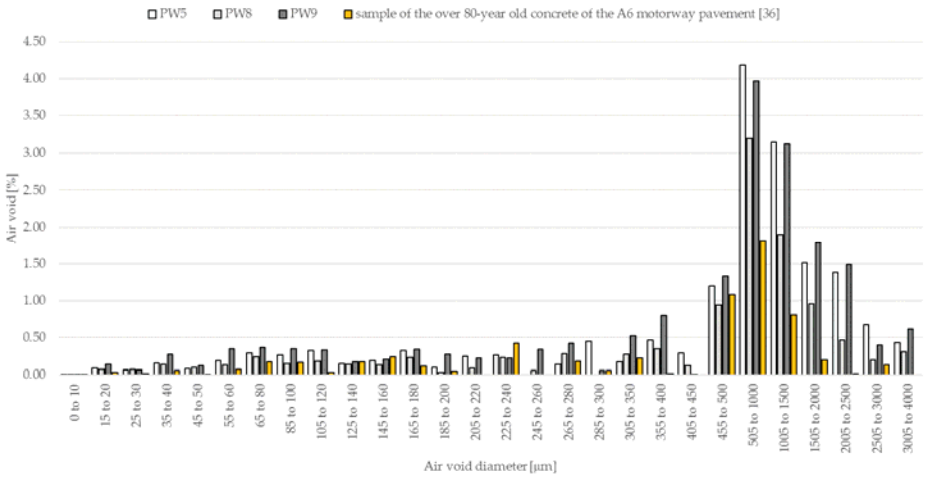


Figure 8. The distribution of air void diameters in the analysed concrete and sample of the over 80 year-old concrete of the A6 motorway pavement [36].

Linear relationships were obtained between the 28 day compressive strength and both of the analysed parameters, i.e., waste glass to cement ratio by weight and the water–cement ratio. From the results of the statistical analysis of the mechanical parameters obtained in the tests, it can be seen that the compressive strength increased with the increasing proportion of glass powder and the decreasing level of the water–cement ratio. The tests confirm how strongly the compressive strength depends on the water–cement ratio of the concrete mix. Within the analysed ranges, the effects of glass powder and water–cement ratio on the freeze–thaw durability of concrete are not statistically significant.

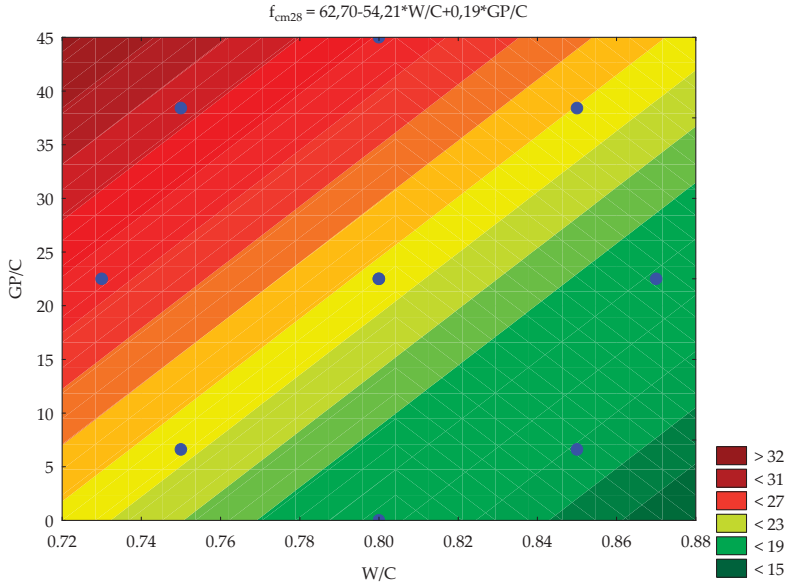


Figure 9. Contour diagram of the relationship between compressive strength and the amount of glass powder and water–cement ratio.

4. Conclusions

The tests carried out as part of this research and the analysis of the obtained result allow us to draw the following conclusions:

1. Glass powder changes the properties of low-strength concrete mixes (as compared to the control mix PW7 with the same water–cement ratio and without ground waste glass addition) as follows:
   - Improves the 28 day compressive strength by ca. 20% and 40% when added at the proportions of 22.5% and 45%, respectively;
   - Does not increase water absorption;
   - Improves the freeze–thaw durability of concrete (without the presence of de-icing agents), which is testified by compliance with the requirements given for F100 concretes designated PW8–PW10.
2. Except for PW3 and PW6, all of the tested mixes satisfied the requirements of [25] in terms of the assumed strength class and can be used for casting of footings to support kerbs and road gutters placed aside the road pavements.
3. Mixes PW2 and PW5, in addition to the above-mentioned requirements, also satisfy the compressive strength, water absorption and freeze–thaw resistance criteria defined for concrete class F25 in the Polish standard no. PN-S-96014:1997 [26], and thus can be used as road-base material under bus lay-bys and for bespoke design road pavements.
4. The average parameters of the microstructure of air voids according to the standard [35] in specimens of concrete marked as PW5, PW8 and PW9 confirm that they meet the requirements that refer to the air void spacing factor and the content of micro-air-voids with a diameter lower than 300 μm for concrete utilized in an XF aggressive environment and correspond with the results of freeze–thaw resistance.

Therefore, it is possible to produce lower strength concrete mixes containing ground waste glass in the role of filler, i.e., not as a partial substitute to cement. It remains to say, based on the study results, that the prospects for recycling waste glass as a component of concrete mixes are promising. This opinion must, however, be verified by further testing, especially using higher strength mixes. Such verification should cover, in particular, the durability of concrete, including resistance to the action of de-icing salts.

Author Contributions: Conceptualization, R.J. and F.S.; preparation of samples for testing, R.J. and F.S.; testing of concrete samples F.S.; determination of the air void size distribution T.R.; methodology, T.R. and J.K.; statistical analysis, R.J.; writing—original draft preparation, R.J.; writing—review and editing, R.J., J.K., T.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Available online: https://feve.org/about-glass/statistics/ (accessed on 30 September 2020).
2. Sordoń-Kulibaba, B. Management of glass waste and glass packaging. *Glass Ceram.* **2008**, *59*, 15–17.
3. Shao, Y.; Lefort, T.; Moras, S.; Rodrigez, D. Studies on Concrete Containing Ground Waste Glass. *Cem. Concr. Res.* **2000**, *30*, 91–100. [CrossRef]
4. Islam, G.M.S.; Rahman, M.H.; Kazi, N. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *Int. J. Sustain. Built Environ.* **2017**, *6*, 37–44. [CrossRef]
5. Meena, M.K.; Gupta, J.; Nagar, B. Performance of concrete by using glass powder. *Int. Res. J. Eng. Technol.* **2018**, *5*, 840–844.
6. Omran, A.F.; Morin, E.D.; Harbec, D.; Tagnit-Hamou, A. Long-term performance of glass-powder concrete in large-scale field applications. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *135*, 43–58. [CrossRef]
7. Serpa, D.; Silva, S.S.; de Brito, J.; Pontes, J.; Soares, D. ASR of mortars containing glass. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *47*, 489–495. [CrossRef]
8. Du, H.; Tan, K.H. Properties of high volume glass powder concrete. *Cem. Concr. Compos.* **2017**, *75*, 22–29. [CrossRef]
9. Tamanna, N.; Tuladhar, R. Sustainable Use of Recycled Glass Powder as Cement Replacement in Concrete. *Open Waste Manag. J.* **2020**, *13*, 1–13. [CrossRef]

10. Zidol, A.Z.; Tognonvi, M.T.; Tagnit-Hamou, A. Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability. *New J. Glass Ceram.* **2017**, *7*, 34–47. [CrossRef]
11. Kamali, M.; Ghahremaninezhad, A. Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *98*, 407–416. [CrossRef]
12. Olofinnade, O.M.; Ede, A.N.; Ndambuki, J.M.; Ngene, B.U.; Akinwumi, I.I.; Ofuyatan, O. Strength and microstructure of eco-concrete produced using waste glass as partial and complete replacement for sand. *Cogent Eng.* **2018**, *5*, 1483860. [CrossRef]
13. Małek, M.; Łasica, W.; Jackowski, M.; Kadela, M. Effect of Waste Glass Addition as a Replacement for Fine Aggregate on Properties of Mortar. *Materials* **2020**, *13*, 1–19.
14. Drzymała, T.; Zegardło, B.; Tofilo, P. Properties of Concrete Containing Recycled Glass Aggregates Produced of Exploded Lighting Materials. *Materials* **2020**, *13*, 3189. [CrossRef] [PubMed]
15. Sikora, P.; Horszczaruk, E.; Rucińska, T.; Straszyńska, A. The influence of elevated temperature on the mechanical properties of cement mortars with waste glass. *Build. Mater.* **2015**, *5*, 116–118.
16. Rutkowska, G.; Wichowski, P.; Lipiński, R. Impact of crushed glass waste on chosen properties of concrete made with its addition. *Sci. Rev. Eng. Environ. Sci.* **2018**, *27*, 463–475.
17. Sičáková, A.; Špak, M. The Effect of a High Amount of Micro-Fillers on the Long-Term Properties of Concrete. *Materials* **2019**, *12*, 3421. [CrossRef]
18. Jackiewicz-Rek, W.; Kopytko, M.; Opłocka, E. The impact of glass cullet from recycling on the strength and durability of concrete. *Eng. Constr.* **2019**, *9*, 429–434.
19. Czapik, P. Microstructure and Degradation of Mortar Containing Waste Glass Aggregate as Evaluated by Various Microscopic Techniques. *Materials* **2020**, *13*, 2186. [CrossRef]
20. Bhandari, P.S.; Tajne, K.M. Use of waste glass in cement mortar. *Int. J. Civ. Struct. Eng.* **2013**, *4*, 704–711.
21. Najduchowska, M.; Pabiś, E.; Rolka, G.; Baran, T. The properties of concrete containing glass cullet. In *Monografie Technologii Betonu, Proceedings of the Dni Betonu, Wisła, Poland, 10–12 October 2016*; Stowarzyszenie Producentów Cementu: Kraków, Poland, 2016.
22. Gołek, Ł.; Kapeluszna, E. Using glass cullet and fluidal ashes for the production of binders. *Word Glass* **2013**, *5*, 42–44.
23. *Catalogue of Typical Structures of Flexible and Semi-Rigid Pavements*; GDDKiA: Warszawa, Poland, 2014. Available online: https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumenty-techniczne_8162/Dokumenty%20techniczne/KTKNPiP.pdf (accessed on 30 September 2020).
24. *Catalogue of Typical Structures of Rigid Pavements*; GDDKiA: Warszawa, Poland, 2014. Available online: https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumenty-techniczne_8162/Dokumenty%20techniczne/KTKNS.pdf (accessed on 30 September 2020).
25. *Conditions of Execution and Acceptance of Construction Works. D-08.01.01 Concrete kerbs*; GDDKiA: Warszawa, Poland, 2019. Available online: https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumentytechniczne_8162/WWiORB/punkt%208/D-08.01.01_KRAWĘŻNIKI%20BETONOWE_V01.pdf (accessed on 30 September 2020).
26. PN-S-96014:1997. *Roads – Cement concrete base course – Requirements and Test*; PKN: Warsaw, Poland, 1997.
27. TIBCO Software Inc. Statistica Version 13. 2017.
28. *EN 12350-2:2019 Testing fresh concrete – Part 2: Slump test*; Comite Europeen de Normalisation: Brussels, Belgium, 2019.
29. EN 12350-7:2019- Testing fresh concrete. *Air content. Pressure Methods*; Comite Europeen de Normalization: Brussels, Belgium, 2019.
30. EN 12350-6:2019 Testing fresh concrete. *Density*; Comite Europeen de Normalisation: Brussels, Belgium, 2019.
31. EN 12390-3:2019 Testing Hardened Concrete. *Compressive Strength of Test Specimens*; Comite Europeen de Normalisation: Brussels, Belgium, 2019.
32. *EN 206:2014 Concrete—Specification, Performance, Production and Conformity*; Comite Europeen de Normalisation: Brussels, Belgium, 2014.
33. *PN-B-06250:1988 Polish Standard Normal Concrete (in Polish)*; PKN: Warsaw, Poland, 1988.
34. *EN 480-11:2008 Admixtures for Concrete, Mortar and Grout-Test Methods—Part 11: Determination of Air Void Characteristics in Hardened Concrete*; Comite Europeen de Normalisation: Brussels, Belgium, 2008.
35. *Conditions of Execution and Acceptance of Construction Works. D-05.03.04 Cement Concrete Pavement*; GDDKiA: Warszawa, Poland, 2019. Available online: https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumenty-techniczne_8162/WWiORB/punkt%205/D05.03.04_NAWIERZCHNIA%20Z%20BETONU%20CEMENTOWEGO_V02.pdf (accessed on 30 September 2020).
36. Rudnicki, T.; Jurczak, R. Recycling of a Concrete Pavement after over 80 Years in Service. *Materials* **2020**, *13*, 2262. [CrossRef] [PubMed]

Oryginalny artykuł naukowy (Original research paper)
MATERIAŁY BUDOWLANE SCIENCE
materialybudowlane.info.pl/science

dr hab. inż. Jacek Korentz, prof. UZ[1)*)]
ORCID: 0000-0002-1521-8681
mgr inż. Filio Szmatuła[1)]
ORCID: 0000-0001-9725-1540

Właściwości zapraw cementowych z dodatkiem rozdrobnionego GFRP z recyklingu łopat turbin wiatrowych

Properties of cement mortars with the addition of minced GFRP from recycled wind turbine blades

DOI: 10.15199/33.2023.11.

Streszczenie. W przyszłości największym wyzwaniem dla energetyki wiatrowej będzie recykling łopat turbin wiatrowych. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości fizycznych i mechanicznych zapraw cementowych modyfikowanych dodatkiem proszków pochodzących z recyklingu mechanicznego łopat turbin wiatrowych wykonanych z kompozytów szklanych. Duży dodatek tych proszków powoduje zmniejszenie wytrzymałości zapraw na ściskanie i zginanie, co jest związane z pogorszeniem urabialności mieszanki, zmniejszeniem gęstości pozornej oraz zwiększeniem porowatości i nasiąkliwości stwardniałych zapraw.
Słowa kluczowe: kompozyty; recykling; zaprawy cementowe; wytrzymałość.

Abstract. The recycling of wind turbine blades will be the biggest challenge for the wind power industry in the near future. This paper presents the results of a study of the physical and mechanical properties of cementitious mortars modified with the addition of powders from the mechanical recycling of wind turbine blades made from glass composites. Increased powder addition decreases the compressive and flexural strength of mortars, which is associated with a decrease in the workability of the mixture, a decrease in apparent density and an increase in the porosity and absorbability of the hardened mortars.

Keywords: composites; recycling; cement mortars; strength.

Żywice wzmocnione włóknami FRP *(Fiber Reinforced Polymer)*, tworzywa termoutwardzalne oraz tworzywa termoplastyczne są powszechnie stosowane jako zamienniki metali w wielu zastosowaniach przemysłowych. Materiały kompozytowe w pewnych okolicznościach mają przewagę nad wieloma tradycyjnymi materiałami, takimi jak stal, beton oraz drewno. Ich zalety, to zazwyczaj mniejsza gęstość, lepsze właściwości mechaniczne w określonych kierunkach, łatwość produkcji wyrobów o różnym kształcie, łatwość montażu i duża trwałość w trudnych środowiskach chemicznych i wodnych. Obecnie znaczna część odpadów FRP, wytwarzanych na całym świecie, trafia na wysypiska śmieci lub jest spalana jako paliwo alternatywne.

Energia wiatru jest jednym z najważniejszych odnawialnych źródeł energii. Wszystkie prognozy wskazują, że będzie nadal szybko się rozwijać w ciągu następnej dekady. Łopaty turbin wiatrowych (WT) są wykonane z materiałów kompozytowych zawierających przede wszystkim żywicę termoutwardzalną i włókna szklane (GF), a także włókna węglowe (CF). Łopaty turbiny wiatrowej składają się z dwóch powierzchni poszycia o konstrukcji sandwiczowej, połączonych ze sobą jednym lub kilkoma żebrami lub belką skrzynkową. Część konstrukcyjną łopaty stanowią kompozyty szklane lub węglowe, a część niekonstrukcyjną kompozyty szklane uzupełnione lekkimi materiałami wypełniającymi, takimi jak balsa lub pianka poliuretanowa [1] – 80 – 90% masy łopaty to materiał kompozytowy, z czego 60 – 70% stanowią włókna wzmacniające, a pozostałe 30 – 40% żywica. W skład masy łopaty w niewielkim stopniu wchodzą również: drewno, pianka, balsa, kleje, żelkot i farba [2].

Obecnie pierwsze turbiny wiatrowe zbliżają się do końca okresu eksploatacji, ponieważ ich żywotność wynosi 20 – 25 lat [3], a wkrótce ich liczba znacznie się zwiększy. Szacuje się, że ok. 25 tys. ton łopat rocznie osiągnie koniec żywotności do 2025 r. [4], a do 2050 r. zostanie wygenerowanych 2 mln ton odpadów z łopat turbin wiatrowych [5]. Recykling tych łopat jest skomplikowany i kosztowny, ponieważ kompozyty szklane lub węglowe są trudne do przetworzenia i wymagają stosowania specjalistycznych urządzeń i technologii. Zużyte łopaty turbin wiatrowych mogą być również poddawane naprawie oraz regeneracji i wtedy są powtórnie wykorzystywane w siłowniach wiatrowych [6] lub po odpowiednim przygotowaniu mogą mieć alternatywne zastosowanie jako obiekty małej architektury, kładki dla pieszych, elementy budynków, ekrany akustyczne [7]. Coraz większa część odpadów FRP poddawana jest recyklingowi, a najczęściej stosowanymi metodami jest recykling: mechaniczny; termiczny (piroliza); chemiczny (solwoliza) oraz fragmentacja wysokonapięciowa [8, 9]. Recykling mechaniczny polega na dokładnym mieleniu materiałów po wstępnym etapie cięcia, kruszenia i rozdrabniania na mniejsze kawałki o różnych frakcjach. Efektem procesów

[1)] Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Budownictwa
[*)] Adres do korespondencji: j.korentz@ib.uz.zgora.pl

recyklingu jest degradacja matrycy kompozytowej, w wyniku czego powstają opady, które mogą być ponownie wykorzystane. Są to oleje, gazy i produkty stałe – włókna, ścier, pył.

Badania nad wykorzystaniem odpadów z recyklingu mechanicznego GFRP *(Glass Fiber Reinforced Polymer)* w cementowych materiałach budowlanych są wielokierunkowe. Odpowiednio rozdrobnione odpady z kompozytów szklanych mogą być podawane do pieca jako surowiec do produkcji klinkieru cementowego i jako paliwo wtórne, a w zależności od uzyskanej wielkości frakcji po rozdrobnieniu próbuje się zastąpić cement, kruszywo drobne oraz kruszywo grube odpadami z łopat, a także wprowadzić te odpady do matrycy cementowej jako zbrojenie rozproszone [10, 11].

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu dodatku dwóch rodzajów odpadów pylastych, pochodzących z recyklingu mechanicznego łopat GFRP, na wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne zapraw cementowych.

Materiały i metody

Badane zaprawy cementowe modyfikowano różną ilością dwóch rodzajów proszków (pyłów) pozyskanych z instalacji odpylania podczas recyklingu mechanicznego łopat turbin wiatrowych wykonanych z kompozytów szklanych. Celem przeprowadzonych badań było określenie możliwości zastosowania tego rodzaju dodatku do spoiwa cementowego pod kątem zachowania deklarowanej klasy wytrzymałości cementu. Badania zapraw cementowych obejmowały oznaczenie: wytrzymałości na ściskanie i zginanie po 2 i 28 dniach dojrzewania; gęstości pozornej i nasiąkliwości po 28 dniach dojrzewania oraz określenie konsystencji świeżej mieszanki.

Do wykonania zapraw zastosowano cement CEM I 42,5R, którego właściwości użytkowe przyjęto z deklaracji producenta, oraz piasek normowy CEN i wodę destylowaną o temperaturze 20ºC, a także dwa rodzaje odpadów z recyklingu w postaci proszków, które opisano jako proszek biały (WP) i różowy (PP). Zaprawy wykonane na bazie proszku białego i proszku różowego oznaczono odpowiednio jako WPM i PPM.

Skład zarobów zapraw cementowych był następujący: cement – 450 g; woda – 225 ml; piasek normowy – 1350 g, a procentowa ilość proszków WP i PP w stosunku do stałej masy cementu wynosiła 5, 10, 15, 20, 30 i 40%, co stanowi wagowo odpowiednio 22,5, 45, 67,5, 90, 135 i 180 g. Wskaźnik wodno-cementowy zapraw w/c = 0,5. W zarobach nie stosowano plastyfikatorów. Badania wytrzymałości zapraw na ściskanie i zginanie przeprowadzono na beleczkach 40 x 40 x 160 cm zgodnie z normą PN-EN 196-1:2016. *Metody badania cementu, Część 1: Oznaczanie wytrzymałości*.

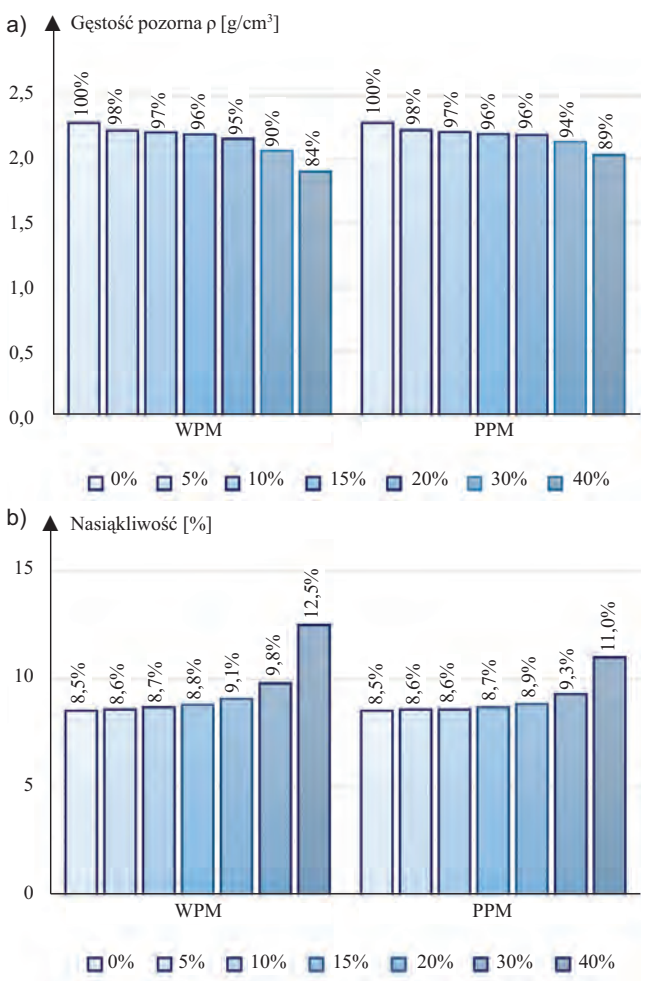
Wyniki badań

Właściwości fizyczne. Ważnym czynnikiem decydującym o właściwościach stwardniałych zapraw cementowych i betonów jest ich urabialność i konsystencja. Wykonano badania konsystencji zapraw cementowych, której wyznacznikiem jest średnica rozpływu na stoliku. Badania przeprowadzono zgodnie z PN-EN 1015-3:2000 *Metoda badania zapraw do murów – Określenie konsystencji zaprawy (za pomocą stolika rozpływu)*. W tabeli zamieszczono wyniki przeprowadzonych badań konsystencji zapraw.

Średnica rozpływu mieszanek zaprawy referencyjnej, bez dodatku proszków, wynosiła 155 mm. Mieszanki z dodatkiem proszku PPM wykazywały się bardziej plastyczną konsystencją niż mieszanki z dodatkiem proszku WPM. Średnica rozpływu mieszanek PPM była większa niż mieszanek WPM. W przypadku dodania 15% i więcej proszku białego oraz 20% i więcej proszku różowego, średnica rozpływu była taka sama jak bazowa średnica stożka. Uzyskane wyniki badań świadczą o dużej wodożądność zastosowanych proszków, co pogarszało w istotny sposób konsystencję i urabialność z mieszanek cementowych. Na rysunku 1a przedstawiono wyniki badania gęstości pozornej zapraw, a na rysunku 1b ich nasiąkliwości. Zgodnie z oczekiwaniami zwiększanie dodatku proszków WP i PP spowodowało zmniejszenie gę-

Wyniki badań konsystencji zapraw WPM i PPM
Consistency test results for WPM and PPM mortars

Zawartość WP i PP [%]	Średnica rozpływu [mm]	
	WPM	PPM
0	155	155
5	133	142
10	110	122
15	100	110
20	100	100
30	100	100
40	100	100



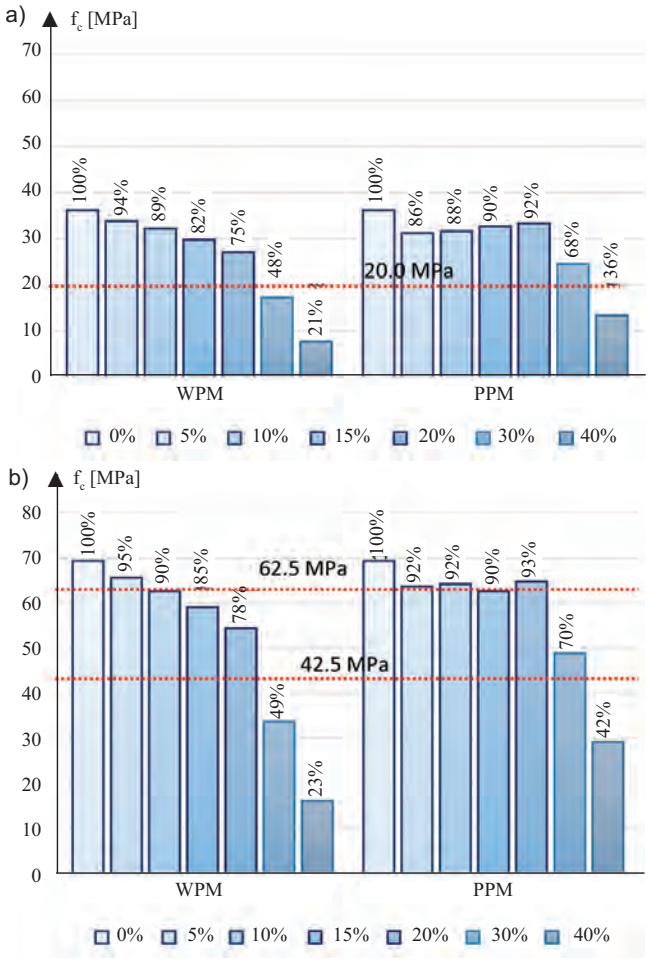
Rys. 1. Wpływ dodatku proszków WP i PP na: a) gęstość pozorną ρ ($\rho_{0\%}$ = 2,284 g/cm³; b) nasiąkliwość *w*
Fig. 1. Effect of the addition of WP and RP powders on: a) apparent density ρ ($\rho_{0\%}$ = 2,284 g/cm³; b) saturation w

stości pozornej i zwiększenie nasiąkliwości zapraw. Przy ustalonej recepturze zarobów dodatek proszków WP i PP miał wpływ na konsystencję zapraw. W skrajnym przypadku stwierdzono zmniejszenie gęstości pozornej o 16%. Z kolei największa ilość dodanego proszku białego (40%) spowodowała zwiększenie nasiąkliwości zaprawy o prawie 50% w porównaniu z próbką referencyjną. Wynika to ze zwiększenia porowatości zapraw, będącej efektem pogarszającej się urabialności wraz ze wzrostem ilości dodawanych proszków.

Właściwości mechaniczne. Na rysunku 2 pokazano wpływ dodania do zaprawy proszków białego WP i różowego PP na dwudniową i 28-dniową wytrzymałość na ściskanie. W obu przypadkach dodatek proszków WP i PP powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z próbkami referencyjnymi bez dodatku proszków. Dodatek proszku WP w ilości 5 – 20% powoduje liniowy spadek wytrzymałości dwu- i 28-dniowej odpowiednio do 75 i 78% wytrzymałości referencyjnej. Dodatek proszku PP w ilości 5 – 20% powoduje natomiast, że jest mniej więcej stały spadek wytrzymałości wczesnej i normowej niezależnie od ilości dodawanego proszku, a wytrzymałość zmienia się o 90 – 93% w odniesieniu do wytrzymałości próbek referencyjnych. Dodatek proszków WP i PP w ilości 30% i 40% skutkuje zmniejszeniem wytrzymałości dwudniowej odpowiednio do 21 i 36%, a wytrzymałości 28-dniowej odpowiednio do 23 i 42%.

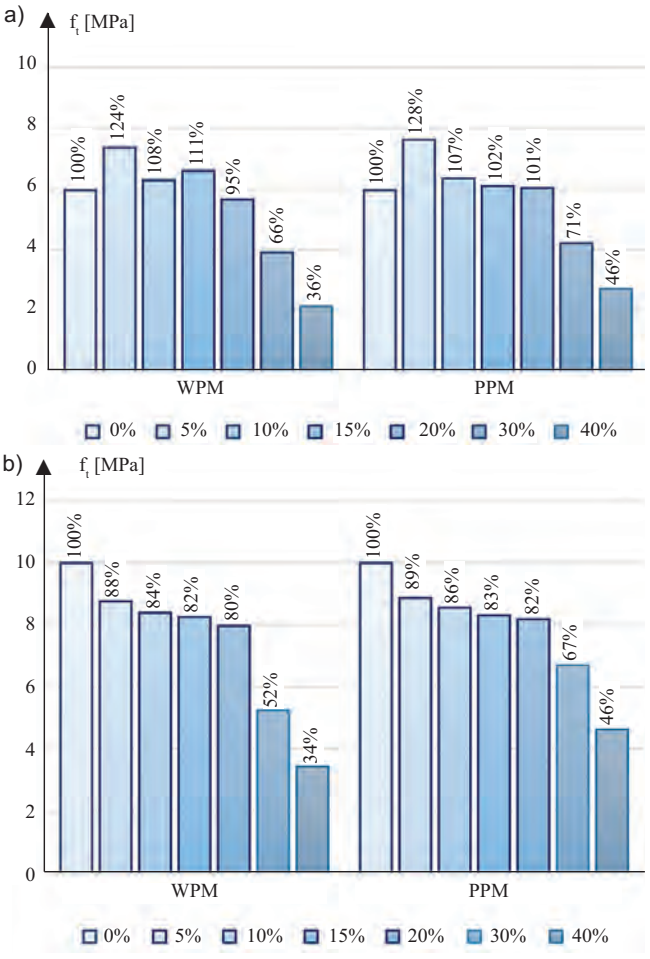
Stwierdzono, że zaprawy z dodatkiem PP mają większą wytrzymałość na ściskanie niż z dodatkiem proszku WP. Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie jest efektem wzrostu porowatości zapraw w wyniku pogarszającej się urabialności mieszanek ze wzrostem ilości dodatku proszków. W przypadku dodatku 20% proszków WP i PP wytrzymałość na ściskanie nie jest mniejsza od 80% wytrzymałości referencyjnej i zgodnie z normą PN-EN 197-1:2012 *Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku* cement użyty w badaniach wraz z dodaniem proszków WP i PP ma wymagane cechy mechaniczne cementu klasy 42,5, ponieważ wczesna i normowa wytrzymałość na ściskanie zapraw spełniają wymagania normowe: $f_{c2,20\%} > 20$ MPa i $f_{c28,20\%} > 42,5$ MPa (rysunek 2).

Wpływ dodatku proszków WP i PP do zapraw na dwu- i 28-dniową wytrzymałość na rozciąganie podczas zginania przedstawiono na rysunku 3. Efektem dodania 5 – 20% prosz-



Rys. 2. Wpływ dodatku proszków WP i PP na wytrzymałość na ściskanie f_c: a) wytrzymałość wczesna ($f_{c2,0\%}$ = 36,2 MPa); b) wytrzymałość normowa ($f_{c28,0\%}$ = 69,4 MPa)

Fig. 2. Effect of the addition of WP and PP powders on the compressive strength f_c: a) early strength ($f_{c2,0\%}$ = 36,2 MPa); b) normal strength ($f_{c28,0\%}$ = 69,4 MPa)

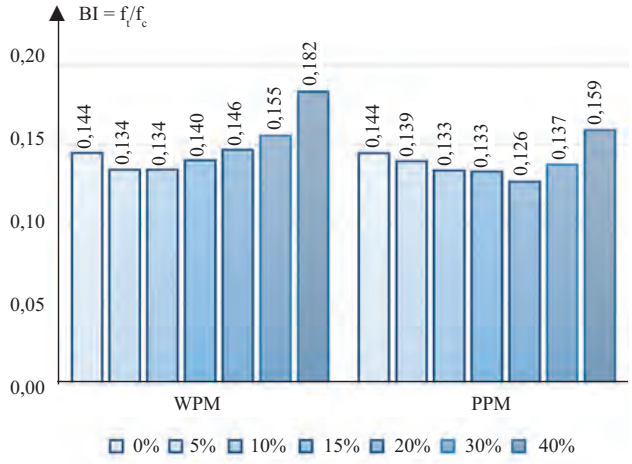


Rys. 3. Wpływ dodatku proszków WP i PP na wytrzymałość na zginanie f_t: a) wytrzymałość wczesna ($f_{t2,0\%}$ = 5,95 MPa); b) wytrzymałość normowa ($f_{t28,0\%}$ = 9,99 MPa)

Fig. 3. Effect of the addition of WP and PP powders on the flexural strength f_t: a) early strength ($f_{t2,0\%}$ = 5,95 MPa); b) normal strength ($f_{t28,0\%}$ = 9,99 MPa)

ku WP i PP jest wzrost dwudniowej wytrzymałości na zginanie do 124% w przypadku proszku WP i do 128% proszku RP, a efektem dodatku proszków w ilości 30 i 40% jest spadek wytrzymałości do 36 i 46% wytrzymałości referencyjnej odpowiednio w przypadku WP i PP. Po 28 dniach dojrzewania mamy do czynienia ze zmniejszeniem wytrzymałości na zginanie wraz ze wzrostem ilości dodanych proszków WP i PP. Charakter zmian wytrzymałości w przypadku obu proszków jest bardzo podobny. Dodatek proszków nieprzekraczający 20% powoduje, że wytrzymałość na zginanie stanowi nie mniej niż 80% wytrzymałości referencyjnej, a po przekroczeniu tej ilości wytrzymałość na zginanie zmniejsza się do 34% w przypadku WP i do 46% w przypadku PP.

Pozytywny wpływ dodatku proszków WP i PP na wytrzymałość dwudniową na zginanie (rysunek 3a) jest zaskakujący, biorąc pod uwagę zmniejszenie wytrzymałości wczesnej na ściskanie (rysunek 2a). Stwierdzony wzrost wytrzymałości na zginanie może wskazywać na obecność bardzo drobnych frakcji włóknistych w proszkach białym i różowym, które mogły zadziałać jak mikrozbrojenie rozproszone. Na rysunku 4 zamieszczono wykresy słupkowe ilustrujące wpływ dodatku proszku białego i różowego na wskaźnik kruchości BI *(Brittleness Index)* stwardniałych zapraw po 28 dniach dojrzewania, który jest zdefiniowany jako iloraz wytrzymałości na rozciąganie f_t i wytrzymałości na ściskanie f_c. Im mniejsza jest wartość wskaźnika BI, tym większa kruchość materiału. Wskaźnik kruchości betonów wynosi ok. 1/8 = 0,125, a badanych zapraw zmienia się z ilością proszków WP oraz PP i osiąga pewne minimum, a jego wartość zależy od rodzaju proszku. W przypadku zapraw z proszkiem białym WPM różnica między wytrzymałością na rozciąganie i wytrzymałością na ściskanie jest mniejsza niż w przypadku zapraw z proszkiem różowym PPM.



Rys. 4. Wpływ dodatku proszków WP i PP na wskaźnik kruchości BI = $f_{t,28}/f_{c,28}$

Fig. 4. Effect of the addition of WP and PP powders on the brittleness index BI = $f_{t,28}/f_{c,28}$

Podsumowanie

Recykling łopat turbin wiatrowych staje się bardzo dużym wyzwaniem dla branży energetycznej ze względu na szybki rozwój farm wiatrowych. Podejmowane są więc intensywne badania dotyczące recyklingu łopat turbin wiatrowych, w tym zastosowania odpadów z recyklingu mechanicznego FRP w betonach cementowych.

Dodatkami do betonów pochodzącymi z recyklingu kompozytów szklanych można modyfikować właściwości mechaniczne i fizyczne zapraw i betonu. Dodanie odpadów GFRP, w postaci proszków WP i PP, w ilości większej niż 20% masy cementu, pogarsza właściwości mechaniczne zapraw cementowych. Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie jest bardzo duże. Zastosowanie tych odpadów w ilości do 20% masy cementu daje efekty w przypadku produkcji betonów do zastosowania na elementy konstrukcyjne, np. ławy i ściany fundamentowe, ale przede wszystkim do wykonywania betonów niekonstrukcyjnych, takich jak beton architektoniczny, obiekty małej architektury oraz galanteria budowlana. Jednak konieczne są dalsze badania dotyczące między innymi mrozoodporności.

Dodatkiem proszków WP i PP można modyfikować właściwości fizyczne zapraw cementowych i betonu. Dodatek proszków WP i RP do zapraw cementowych obniża istotnie ich gęstość pozorną i zwiększa porowatość, a tym samym przyczynia się do zmniejszenia współczynnika przewodzenia ciepła oraz zwiększenia nasiąkliwości.

Głównymi problemami związanymi z wykorzystaniem odpadów pochodzących z recyklingu w betonach cementowych są nieznane właściwości materiału źródłowego, który został poddany recyklingowi, oraz potencjalnie duże zróżnicowanie właściwości materiałów pochodzących z recyklingu dostarczanych do zakładu produkcji betonu.

Literatura

[1] Mishnaewsky L. Beranner K. Petersen H. N. Beauson J. McGugan M. SorensenB. F. Materials for wind blades: An overview. Materials. 2017; 10, 1285.

[2] Cooperman A. Eberle A. Lantz E. Wind turbine blade material in the unitedstates: quantities, costs, and end-of-life options. Resources Conservation and Recycling. 2021, 168, 105439.

[3] Recykling albo budownictwo. Drugie życie łopat wiatrowych. Dostępne online: https://zielonagospodarka.pl/recykling-albo-budownictwo-drugie-zycie-lopat-wiatrowych-1766 (29.04.2023r.)

[4] Newly Discovered Chemical Process Renders All Existing Wind Turbine Blades Recyclable. Dostępne online: https://www.offshorewind.biz/2023/02/08/newly-discovered-chemical-process-renders-all-existing-wind-turbine-blades-recyclable/ 17.03.2023 r.).

[5] Liu P, Barlow CY. Wind turbine blade waste in 2050 r. Waste Management. 2017; 62, 229 – 240.

[6] Katnam KB, Comer AJ, da Silva LFM, Young TM. Composite repair in wind turbine blades: An overview. The Journal of Adhesion. 2015; 91 (1-2), 113 – 139.

[7] Karavida S. Peponi A. Wind turbine blade waste circularity coupled with urban regeneration: a conceptual framework. Energies. 2022; 16, 1464.

[8] Kwame A-F, Akinlabi ET. Recycling of Fibre Reinforced Composites: A Review of Current Technologies. Proceeding of the DII-2017 Conference on Infrastructure Development and Investment – Strategies for Africa, 30 August – 1 September 2017, Livingstone, Zambia, 157-167.

[9] Oliveux G, Dandy LO, Leeke GA. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. Progress in Materials Scienc. 2015; 71, 61 – 99.

[10] Baturkin D, Hisseine OA, Masmoudi R, Hamou AT, Massicotte L. Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete. Resources. Conservation & Recycling. 2021, 174, 1055807.

[11] Correia JR, Almeida NM, Figueira JR. Recycling of FRPcomposites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. Journal of Cleaner Production. 2011; 19 (15), 1745 – 1753.

Przyjęto do druku: 23.10.2023 r.

polymers

MDPI

Article

Properties of FRC with Carbon Fibres from Recycled Wind Turbine Blades

Filip Szmatuła and Jacek Korentz *

Institute of Civil Engineering, University of Zielona Gora, Prof. Z. Szafrana 1, 65-417 Zielona Góra, Poland
* Correspondence: j.korentz@ib.uz.zgora.pl

Abstract

This paper investigates the use of recycled carbon fibre (rCF) from wind turbine blades in fibre-reinforced concrete (FRC). The research demonstrates the combined effects of fibre length (25 mm, 35 mm, and 45 mm) and fibre content (0.29%, 0.58%, and 0.87% by volume). The experimental programme included the investigation of compressive and tensile splitting strengths, as well as the determination of the Brittleness Index and fracture energy. The transfer of tensile forces through fibres was assessed based on the surface area of split samples. Tensile strength was determined for two loading directions: parallel and perpendicular to the direction of concreting. It was found that the maximum fibre addition reduced the compressive strength by up to 9% and that the tensile strength was significantly dependent on the fibre orientation, which was determined by the direction of concreting. The tensile strength perpendicular to the direction of concreting increased by a maximum of 11.8% and parallel to the direction of concreting by a maximum of 66% compared to plain concrete, depending on the fibre content and length. The research also demonstrated the synergy of pull-out and rupture of fibres in transmitting tensile forces. These studies provide important insights into the applicability of rCF as a dispersed reinforcement in concrete and have important implications for sustainability in the construction sector.

Keywords: fibre reinforced concrete; recycled carbon fibre; mechanical properties

check for updates

Academic Editor: Zina Vuluga

Received: 31 October 2025
Revised: 24 November 2025
Accepted: 26 November 2025
Published: 30 November 2025

Citation: Szmatuła, F.; Korentz, J. Properties of FRC with Carbon Fibres from Recycled Wind Turbine Blades. *Polymers* **2025**, *17*, 3199. https://doi.org/10.3390/polym17233199

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Different types of fibres are now being used in the construction industry to improve the properties of concrete, primarily its ductility and flexural as well as tensile strength. Steel fibre is the most recognized among the commonly used types of fibres. However, carbon fibre's higher tensile strength, low density, and corrosion resistance make it a potentially better alternative to steel fibre, despite its higher cost. Currently, carbon fibres are mainly used in the construction sector for repair, renovation, and structural strengthening works. The application of carbon fibre as dispersed reinforcement is nowadays limited and is still under development.

Activities are also being undertaken on the use of recycled carbon fibres obtained, among other sources, from the recycling of wind turbine blades. Undoubtedly, wind energy is one of the most important renewable energy sources, and the first wind turbines have already reached the end of their service life. Therefore, the biggest challenge for wind power in the near future will be blade recycling.

Turbine blade recycling aligns with the circular economy, a key pillar of the European Union's Green Deal. In the context of wind energy, this involves not only the production of green energy but also a commitment to managing the entire turbine lifecycle responsibly. One

example of this commitment is the use of recycled carbon fibres as reinforcement in concrete elements. This innovative approach reduces waste and creates new, valuable products.

1.1. Recycling of FRP Composites

Wind turbine (WT) blades are primarily made of composite materials composed of thermoset resin and glass fibres (GFs) or carbon fibres (CFs), referred to as glass or carbon fibre-reinforced polymer (GFRP or CFRP, respectively). Currently, CFs are mainly used in girders or structural components of wind blades longer than 45 m in both terrestrial and marine systems. The content of CFRP in the smallest wind turbine blades is equal to only 9%, but it increases to 55% for larger blades when their length exceeds 70 m [1].

The structural part of the blade is composed of GFRP or CFRP, supplemented with lightweight filler materials such as balsa or polyurethane foam [2]. Namely, between 80% and 90% of the blade's mass is composed of composite material, with 60% to 70% consisting of reinforcing fibres and the remaining 30% to 40% made up of resin. The remaining 10% to 20% of the blade's mass consists of wood, foam, balsa, adhesives, gel coat, and paint [3]. It is noteworthy that the first wind turbines are approaching the end of their useful life, which is typically 20 to 25 years [4]. It is estimated that about 25,000 tons of blades will reach the end of their life annually, as of 2025 [5]. Finally, 2 million tons of wind turbine blade waste will be generated by 2050 [6].

There are three methods for utilizing fibre-reinforced polymer, FRP, waste: storage, incineration and co-incineration, and recycling. However, recycling is the most desirable method [7]. Nevertheless, the recycling of wind turbine blades is a complex and costly process, as glass or carbon composites are difficult to process and require specialized equipment and technology. Used wind turbine blades can also be repaired and rehabilitated for reuse in wind turbines [8], or they can be repurposed for alternative applications, such as small architectural objects, pedestrian overpasses, building elements, and noise barriers [9].

Unfortunately, only a part of FRP waste is recycled, with the most common recycling methods including mechanical, thermal, and chemical recycling, as well as high-voltage fragmentation [7]. The result of these recycling processes is matrix degradation, yielding composite wastes that can be reused, including oils, gases, and solid products like fibres, shavings, and dust [10–12].

Research into the use of recycled fibre-reinforced polymers in cementitious materials in the construction sector is multifaceted. Appropriately fragmented glass fibre composite waste can be added into a cement kiln as a raw material for cement clinker production and as a fuel [13]. On the other hand, shredded FRP composite wastes, depending on the fraction sizes obtained after grinding, are being examined as a substitute for cement, fine aggregate, and coarse aggregate replacement, as well as dispersed reinforcement in the cement matrix [14–16].

1.2. FRP Fibres in Concrete

Fibre-reinforced concrete (FRC) offers significant economic and environmental benefits, including a reduced carbon footprint, conservation of natural resources, increased recyclability, and the potential of utilizing waste materials [17].

FRC is a constantly evolving technology that is competitive in many applications. FRC is a cement composite with dispersed reinforcement in the form of steel fibres or non-metallic fibres. These include fibres of varying moduli of elasticity and that are high-strength, such as carbon, polyvinyl chloride, steel, asbestos, and glass fibres, which can significantly increase the strength of concrete, or low-strength, such as nylon, acrylic, and polypropylene fibres, which mainly improve ductility and minimize cracking [18].

Currently, non-metallic fibres can be competitive with steel fibres despite their low Young's modulus (except for carbon fibres). This is due to their different mechanism of pulling out of the matrix and the increased number of individual fibres per unit volume compared to steel fibres. Based on length, a distinction is made between macrofibres and microfibres. Longer fibres can transmit loads acting on structures, so they can perform a structural function and thus replace traditional bar reinforcement. Shorter fibres, as a result of their large number even at low dosages, are more effective in bridging microcracks and reducing the formation of shrinkage cracks [19].

In the search for optimal FRC performance, various fibre combinations are being studied, for example, steel and polyester fibres [20], steel and polypropylene fibres [21], steel and basalt fibres [22], steel, polypropylene, and Kevlar fibres [23], as well as combinations of fibres with reinforcement [24]. The hybridization of different fibre types can improve the strength properties of hybrid fibre-reinforced concrete (HFRC) and provide positive synergistic effects [25]. Combining fibres of different lengths, diameters, moduli of elasticity, and tensile strength is one of several hybridization strategies [18]. Above that, a combination of short and long fibres provides better results than single-length fibres. The issue stems from the use of well-sorted aggregate [26].

Dispersed reinforcement primarily increases tensile strength and ductility, reduces shrinkage from drying, increases impact strength, and, above all, increases the energy dissipated during crack propagation in concrete. The mechanical properties of FRC depend on the type of fibres, their shape, length, diameter, and, most importantly, their quantity. Unlike conventional reinforcing bars, which are specially designed and placed in the tensile zone of the elements, fibres are thin and short, and their distribution in the concrete element is random. The random fibre distribution makes FRC an anisotropic material, which in practice requires ensuring optimal fibre orientation for different load directions [27]. The orientation of the fibres depends on several variables: the wall effect, the casting and compaction process, the concrete consistency, and the types and amounts of fibres [28]. Fibres in the concrete mix tend toward sedimentation and agglomeration and to be self-levelling [29,30].

In self-compacting concretes (SCCs), steel fibres tend to orient in the direction of the mix flow [31]. The orientation of the fibres perpendicular to the direction of concreting is particularly important when the fibres need to carry stresses from a specific load direction [32]. Fibre in FRC works differently in monolithic retaining walls and columns than in slabs or concrete floors, where concreting is in the same direction. Therefore, it is necessary to search for a set of engineering tools to predict fibre orientation in FRC [30]. FRC tests with steel fibres [33] showed that the splitting tensile strength parallel to the direction of concreting was up to 1.5 times higher than for samples tested perpendicular to the direction of concreting. Similar observations were noted in the study in [34], which showed an enhancement in tensile strength of up to 33% and a nearly fourfold increase in dissipated energy. Therefore, to characterize the properties of FRC used in structural elements, there is a need for samples that take into consideration the fibre orientation and can simulate the actual fibre reinforcement mechanisms present in the real structural element [35].

1.3. Carbon FRP Fibres in Concrete

Nowadays, research is being conducted on the use of virgin carbon fibre (vCF) and thermally or chemically recycled carbon fibre (rCF) as fibre reinforcements in concrete (CFRC).

When choosing the type of carbon fibre, economic and environmental aspects are also important. The cost of recycled carbon fibre, rCF, is about 15% of the cost of producing virgin carbon fibre, vCF [36]. In addition, rCF recycling consumes only 5% of the energy required to produce vCF [37]. Therefore, the commercialization of rCFs is warranted due

to their economic and sustainability advantages. However, it is also necessary to confirm the technical benefits. The mechanical properties of rCF are comparable to those of vCF, allowing for the substitution of virgin fibres with recycled fibres, thereby ensuring the previously noted advantages. The best quality of rCF is obtained from thermal and chemical recycling methods, while the worst quality is obtained from mechanical methods [38]. However, it must be mentioned that the mechanical properties of pyrolytic fibres can deteriorate as a result of recycling by thermal methods. Tests conducted on carbon fibres show that the pyrolysis process can leave about 2% of the matrix on the fibre surface, and as a result, the tensile strength of rCF decreases by about 20% compared to vCF [39]. On the other hand, in the case of microwave pyrolysis, the tensile strength of rCF is about 99.4% of that of vFC with a fibre recovery rate of 96–98% [40].

The available research results mostly show an improvement in the mechanical properties of concrete with the addition of vCF. Nevertheless, the results of these studies often differ. Namely, studies of CFRC with the addition of vCF [41–43] showed an increase in compressive strength from 25% to 50%, depending on fibre content. On the other hand, studies [44,45] showed a slight increase in compressive strength by a maximum of 10%. In the case of flexural strength, depending on fibre content, an increase ranging from 15% to 50% was observed [41,44], and in the case of splitting tensile strength, the enhancement varied from 10% to 130% [41,44,46]. The increases in strength also depended on fibre content.

The use of carbon fibres in special concretes is also being studied. Adding vCF fibres to self-compacting concrete increases compressive strength by 47.6%, splitting tensile strength by 27.6%, and flexural strength by 67.2% [47]. Carbon fibre-modified vCF polymer concretes increase flexural strength and splitting tensile strength by 36% and 61%, respectively, depending on the ratio of polymer and cement [48]. In previous concretes, properly prepared, highly comminuted vCF resulted in an improved workability and infiltration rate, as well as an increase in compressive and tensile strength and Young's modulus [49].

In conclusion, studies on the impact of vCF on the CFRC mechanical properties have shown varying results, due to the use of different fibre dosages with distinct physical, mechanical and geometric properties, various types of cement, aggregates, water-to-cement ratios, and workability requirements. In addition, the properties of CFRC are influenced by the shape of the fibre cross-section [50], the relationship between the length and diameter of the fibre aspect ratio [51], as well as the consistency of the mixture [45] and the mixing procedure [52].

Moreover, there are limited studies on the use of rCF in cementitious composites. A study in [53] of ultrahigh-performance concrete (UHPC) with the addition of very short (1.5 mm) rCF showed that the tensile strength of the rCF specimens (36 kg/m^3) was 32% higher, and the flexural strength was 9% lower than that of the reference specimens. Test results [54] of cement mortars with rCF from the automotive industry indicate satisfactory increases in compressive and flexural strength in the range of 10–18% for specimens with a fibre dosage of about 4% and length of 2–5 mm. On the other hand, according to the study in [55], the addition of rCFs with lengths of 3, 6, and 20 mm to cement mortars from mechanically recycled CFRP panels resulted in a slight decrease in compressive strength, an increase in flexural strength of up to 20% and a very large increase in fracture energy of up to 6000%. In the study in [16], on the effect of different amounts and sizes of rCF pieces from CFRP crushing on CFRC strength, a very interesting conclusion was drawn. Namely, in addition to changes in compressive strength from −10% to +20% and flexural strength from −20% to 32%, there was a significant effect of the ratio of rCF piece size to specimen size (size ratio). Tests showed an increase in compressive and flexural strength with a decreasing size ratio.

Carbon fibres have thermal and electrical conductivity similar to metals. Moreover, they are characterized by thermostability and corrosion resistance. Under the influence of load, temperature, and other external factors, CFRC will exhibit pressure and temperature sensitivity with a change in CF spacing, which is one of its most unique attributes. Therefore, as a functional filler, CFs have significant advantages in the manufacturing of smart concrete [56].

There is limited research on rCF derived from recycled wind turbine blades and its application in CFRC. Therefore, it is essential to investigate its behaviour in CFRC and compare it with other commercially available fibre types to assess its suitability as reinforcement for concrete. This study fills a research gap in the application of rFC derived from recycled wind turbine blades in cementitious composites. To this end, selected mechanical and physical properties of CFRC fibres were examined. Specifically, this study investigated how the quantity, length, and orientation of rCF fibres affect the compressive strength, splitting tensile strength, Brittleness Index, energy dissipation, and apparent density of concrete.

2. Materials and Methods

In the study, carbon fibres from recycled wind turbine blades made with carbon composites were used. The carbon fibres were recovered by pyrolysis according to Anmet's technology [57] (Przedsiębiorstwo Wielobranżowe ANMET Andrzej Adamcio, 67-300 Wiechlice, Poland). This process can be used when the propellers, reinforced with fibres, have a length of not less than 50 m. Strips about 50 cm wide (Figure 1b) are cut from the prepared pieces (Figure 1a). The thickness of the blade plating varies from about 10 cm near the hub to 2–3 mm at the end of the blade.



(**a**) (**b**) (**c**)

Figure 1. Steps in recycling wind turbine blades: (**a**) transportation, (**b**) preparation, (**c**) recycling.

The cut strips require cleaning by eliminating glue residues and other composite additives. The finished strips are cut into segments of about 170 cm in length. The next step is the pyrolysis process. The strips are subjected to a temperature of 500 °C for 60 min. After this process, the fibres contain charred resin in an amount equal to about several percent of the total recycled content. The fibre strips are then subjected to rolling (fibrillation), which results in the formation of fibre strands that are about 10 mm wide (Figure 1c), and 0.10 to 0.35 mm thick, with a fibre diameter of 6 μm. Rolling makes it possible to soften the fibres without distorting the parallel arrangement of the internal structure. Subsequently, the prepared fibres are subjected to an oxygen heating process at 500 °C for 30 min. Reheating the strips removes the charred resin, resulting in carbon fibres with a purity close to 100%. The next step is to cut the strips with guillotines into fibres of appropriate length (Figure 2). The average density of the obtained fibres is 1.724 g/cm^3, and their average tensile strength is equal to 1650 MPa.

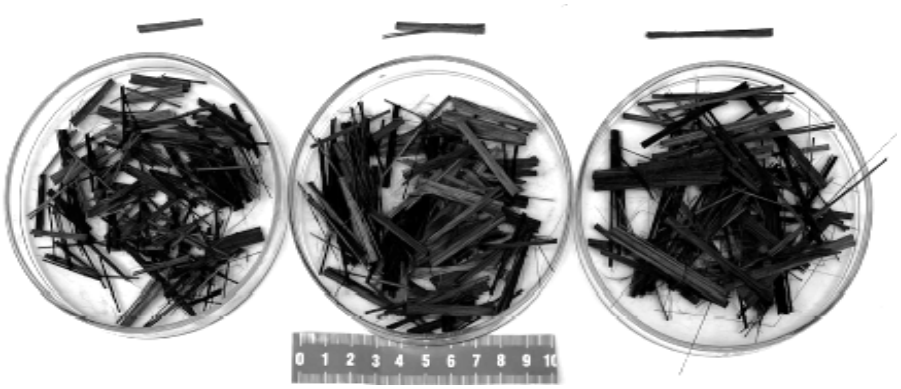


Figure 2. Dispersed reinforcement made of rCF.

For the purpose of this study, fibre strands measuring 10 mm in width were cut into lengths of 25 mm, 35 mm, and 45 mm (Figure 2). The cut resulted in their defragmentation and division into narrower strands.

The experimental campaign involved the determination of the compressive strength fcc, and splitting tensile strength fct of three test series CF-25, CF-35, and CF-45 with carbon fibre lengths of 25 mm, 35 mm, and 45 mm, and with different volumetric contents of 0.29% (5.0 kg/m^3 by weight), 0.58% (10.0 kg/m^3 by weight), and 0.87% (15.0 kg/m^3 by weight).

The concrete was designed assuming a strength class of C35/45. Portland cement CEM-I 42.5R from the Górażdże cement plant and natural aggregate with fractions of 0/2 mm and 2/8 mm were used. Table 1 shows the composition of the reference concrete mixture C-0 without fibres and concrete mixes with the addition of various rCF dosages. The water–cement ratio w/c for all mixes was 0.60.

Table 1. Composition of concrete mixes in kg/m^3.

Mix ID	Cement	Water	Aggregate 0/2 mm	Aggregate 2/8 mm	rCF Fibre
C-0	450	270	375	1500	0
CF-5					5.0
CF-10					10.0
CF-15					15.0

Table 2 shows the results of workability tests carried out by the slump testing method according to [58] for the C-0 reference mix, as well as the CF-25, CF-35, and CF-45 mixes with fibres of three lengths (25 mm, 35 mm, and 45 mm), and four dosages (0.29%, 0.58%, 0.87%, and 1.16%). The workability class was characterized according to the standard [59]. The C-0 reference concrete mix is classified as S3, while all mixes with fibre additions were classified as S1.

Table 2. Workability of concrete mixes.

Series ID	C-0	CF-25			CF-35			CF-45		
rCF length (mm)	-	25			35			45		
rCF dosage (%)	0	0.29	0.58	0.87	0.29	0.58	0.87	0.29	0.58	0.87
Slump (mm)	140	30	20	10	30	20	10	30	20	10
Consistency class	S3	S1			S1			S1		

From the results presented in Table 2, it can be seen that concretes with rCFs had high water demands compared to plain concretes, thus causing significant deterioration in the workability. According to [59], all concretes with rCFs were characterized by the consistency class S1. As can be seen, the workability of the concrete deteriorated with an increase in the number of carbon fibres. The cone slump decreased from 30 mm for a fibre content equal to 0.29% to 10 mm for a fibre content of 0.87%. This is in accordance with other studies in which the slump also decreased, and thus, the concrete mixture's workability deteriorated with an increase in the number of carbon fibres [46] and of steel fibres [60].

Regarding the compressive strength tests, they were carried out perpendicular to the direction of concreting, while splitting tensile strength tests were conducted both perpendicular and parallel to the direction of concreting (Figure 3).

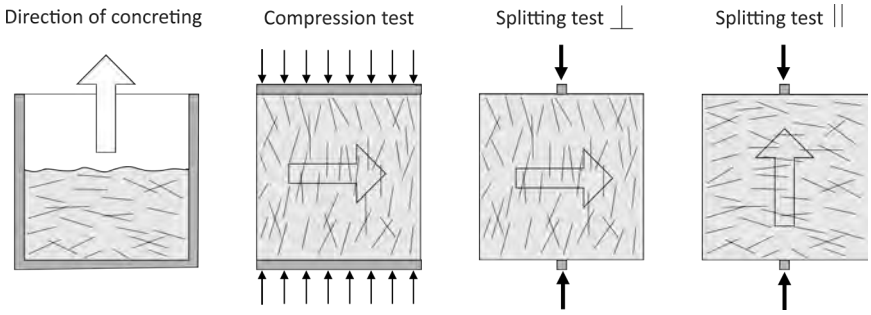
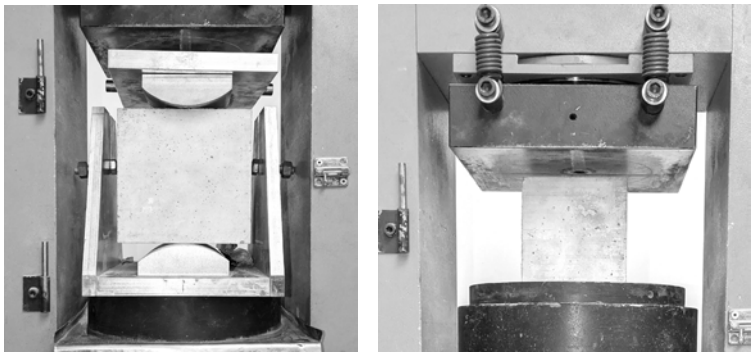


Figure 3. FRC strength test methods.

The setup of the machine for testing tensile strength in splitting and compressive strength is shown in Figure 4.



(**a**) (**b**)

Figure 4. Test machine setup: (**a**) Splitting tensile strength, (**b**) compressive strength.

Compressive strength tests were performed on cubic specimens with a side length of 100 mm according to [61], and splitting tensile strength tests were carried out on cubic specimens with a side length of 150 mm according to [62].

3. Results and Discussion

The results of this study allowed for understanding the modification of some mechanical and physical properties of concrete with the addition of rCFs, compared to plain concrete, taking into account the following effects: 1—the orientation of the rCFs; 2—the content of rCF; and 3—the length of the rCFs.

Table 3 summarizes the average measured values obtained from the tests, where f_{cc} is the compressive strength, $f_{ct,\perp}$ is the splitting tensile strength of samples tested

perpendicular to the direction of concreting, and $f_{ct,\parallel}$ is the splitting tensile strength of samples tested parallel to the direction of concreting, and the calculated values, where *BI* is the Brittleness Index, $FE_{\perp}$ is the fracture energy of samples tested perpendicular to the direction of concreting, and $FE_{\parallel}$ is the fracture energy of samples tested parallel to the direction of concreting.

Table 3. Average values obtained from the tests.

Series ID	rCF (%)	f_{cc}(MPa)	$f_{ct,\perp}$ (MPa)	$f_{ct,\parallel}$ (MPa)	*BI* (−)		$FE_{\perp}$ (J)	$FE_{\parallel}$ (J)
					$f_{ct,\perp}/f_{cc}$	$f_{ct,\parallel}/f_{cc}$		
C-0	0	44.4 (1.5)	2.62 (0.16)		0.059		88 (5)	
CF-25	0.29	45.3 (1.6)	2.63 (0.15)	2.86 (0.18)	0.058	0.063	91 (9)	109 (5)
	0.58	45.1 (1.3)	2.64 (0.21)	2.90 (0.11)	0.059	0.064	92 (10)	122 (10)
	0.87	40.4 (1.9)	2.65 (0.17)	3.26 (0.18)	0.066	0.081	99 (8)	150 (9)
CF-35	0.29	44.2 (1.3)	2.88 (0.19)	3.03 (0.15)	0.065	0.069	104 (12)	132 (8)
	0.58	44.4 (1.7)	2.80 (0.11)	3.10 (0.20)	0.063	0.070	102 (10)	143 (7)
	0.87	40.9 (1.5)	2.75 (0.18)	3.68 (0.12)	0.067	0.090	95 (9)	173 (9)
CF-45	0.29	44.1 (1.1)	2.93 (0.15)	3.06 (0.20)	0.066	0.069	108 (11)	150 (10)
	0.58	42.8 (1.5)	2.86 (0.19)	3.19 (0.17)	0.067	0.075	109 (8)	173 (12)
	0.87	40.2 (1.7)	2.76 (0.21)	4.35 (0.28)	0.069	0.108	107 (10)	231 (13)

Note: The value in parentheses represents the standard deviation of each sample set. The number of samples was 3.

Analysis of the obtained compressive and splitting tensile strength results was carried out using the Strength Enhancement Index [63] calculated according to Formula (1):

$$Strength\ Enhancement = \frac{Strength\ with\ fibres\ - Strength\ without\ fibres}{Stength\ without\ fibres}\ (\%) \quad (1)$$

The analysis of the Brittleness Index *BI* and fracture energy *E* was conducted analogously.

3.1. Apparent Density

Figure 5 shows the results of testing the effect of rCF length and amount on the concrete apparent density ρ. The apparent density of the specimens without the addition of fibres was equal to 2360 kg/m^3.

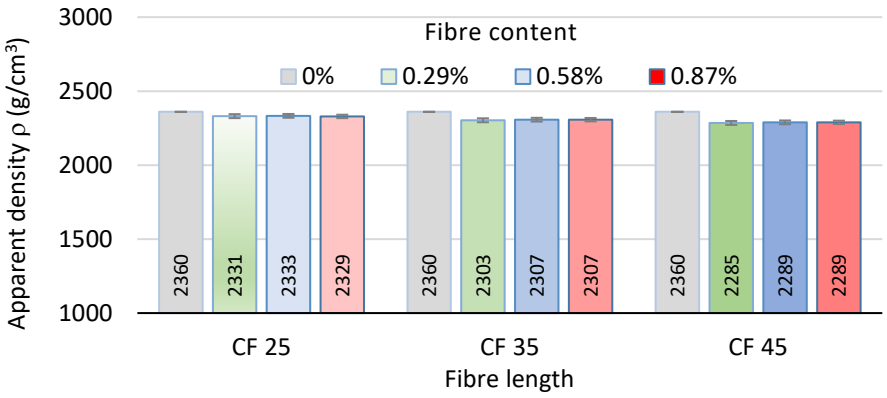


Figure 5. Effect of rCF addition on the concrete apparent density.

As expected, the addition of rCFs caused a decrease in apparent density proportional to the amount of added fibres. The maximum decrease in density was equal to 3% and was denoted for concrete with a fibre content of 1.16%. It was concluded that this was a result

of the combined effect of the addition of fibres of low specific mass and an increase in the porosity of the concrete.

3.2. Compression

Figure 6 shows graphs illustrating the changes in compressive strength of concrete f_{cc} with the addition of rCFs. The average compressive strength of concrete without fibres was equal to 44.4 MPa, and the effect of rCF addition on compressive strength varied depending on the fibre length and dosage. Fibre additions of 0.29% and 0.58% resulted in strength changes of no more than four percent, with a slight increase in strength for CF-25 specimens, and a slight decrease in strength for specimens reinforced with longer fibres—CF-35 and CF-45. In contrast, the addition of 0.87% of fibres, regardless of their length, led to a decrease in compressive strength of nearly 10%.

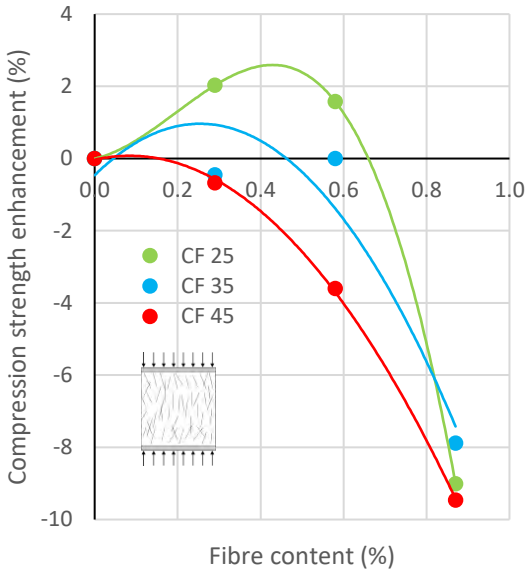


Figure 6. Effect of rCF content and length on concrete compressive strength f_{cc}.

A similar trend of decreasing compressive strength with increasing fibre content was noted in the study in [64], in which, for carbon fibre content equal to 0.2%, 0.4%, 0.6%, and 0.8%, the compressive strength of samples changed by 4.93%, 15.02%, −15.02%, and −23.74%, respectively, compared to the specimen without fibres.

The observed decreases in the compressive strength were primarily the result of the standard requirements for performing the compression test. According to the standard [61], the trowelled surface of the specimen (top surface created during casting) cannot have contact with the pressure plates of the compression testing machine, and thus has to be the side surface during testing. Therefore, the compressive force acted perpendicular to the direction of concreting and, as a result, parallel to the orientation of the rCFs (see Figure 3), which weakened the specimen in the transverse direction. This was mainly the effect of the smooth surface of the used fibres, since the resin, as a coupling agent which is an inorganic compound, reduced the adhesion between the fibres and the cement paste.

3.3. Tension

Splitting tensile tests were conducted parallel ($f_{ct,\parallel}$) and perpendicular ($f_{ct,\perp}$) to the direction of concreting. The tensile splitting strength f_{ct} was calculated using the following formula:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi L h} \quad (2)$$

where F is the maximum load, L is the length of the line of contact of the specimen, and h is the designated cross-sectional dimension.

The results of tensile tests are given in Figure 7. The tensile strength of the concrete without fibre addition was equal to 2.62 MPa. While decreases in compressive strength had been noted, increases in splitting tensile strength were observed. However, it must be noted that the results were significantly dependent on three factors: the orientation of fibres influenced by the direction of concreting, fibre content, and fibre length.

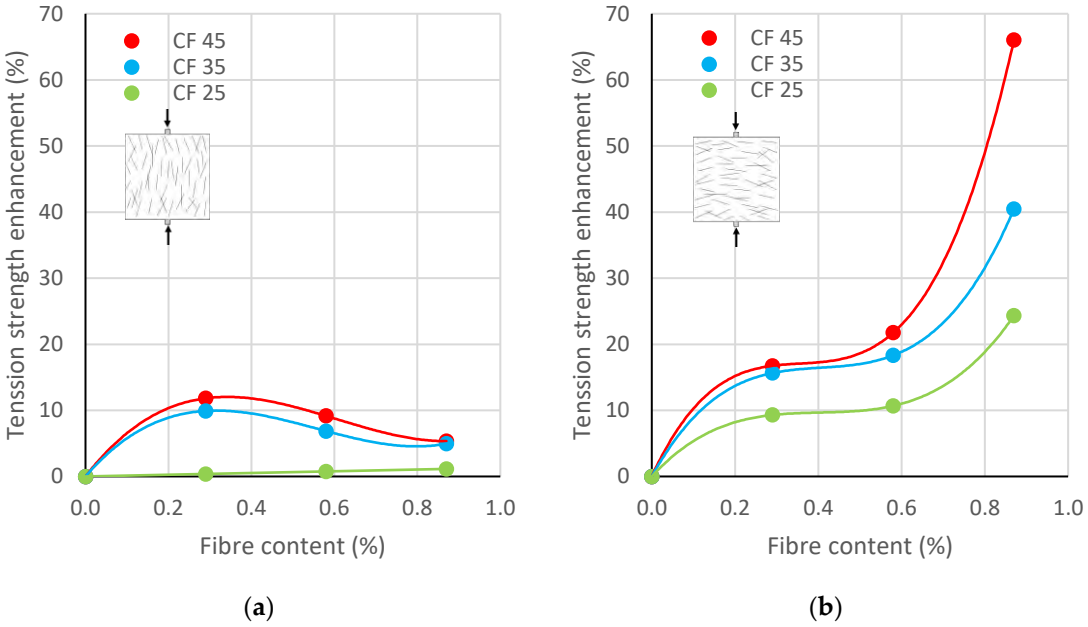


Figure 7. Tensile strength enhancement vs. rCF content for different fibre lengths: (**a**) Perpendicular to the direction of concreting, (**b**) parallel to the direction of concreting.

The tensile strength perpendicular to the direction of concreting was significantly lower than the strength parallel to the direction of concreting. In the case of tensile strength perpendicular to the direction of concreting (Figure 7a), the largest increase in strength, between 5% and 12%, was noted for CF-45 specimens with 45 mm long fibres. A similar trend was also observed for CF-35 samples with 35 mm long fibres—the strength increase varied from 5% to 10%. For CF-25 specimens with a fibre length of 25 mm, the strength increased by no more than 1%. Regarding the tensile strength parallel to the direction of concreting (Figure 7b), for CF-25 specimens it increased from 9% to 24%, for CF-35 specimens from 16% to 40%, and for CF-45 specimens from 17% to 66%, depending on the fibre content.

As previously mentioned, fibres tend to self-level during concrete casting and vibration; i.e., the fibres orient perpendicular to the direction of concreting. The orientation of fibres during testing has a crucial influence on the results and response of the sample. For this reason, the tensile strength of samples with fibres oriented perpendicular to the tensile plane (Figure 7b) was much higher than for samples with fibres arranged parallel to the tensile plane (Figure 7a). According to research [65], fibres oriented at an angle of 90° to 60° to the direction of concreting are effective in transferring tensile forces. Therefore, the correlation between the direction of concreting and the mode of loading should be taken into account in the design and construction of structural elements with FRC.

Furthermore, it was observed that the influence of fibre content on the tensile strength depends on the direction of concreting. The increase in tensile strength perpendicular to the direction of concreting for fibre dosages equal to 0.29% and 0.87% tended to decrease

from about 10% to 6% for CF-35 and CF-45, while for CF-25 the tensile strength remained basically unchanged (Figure 7a). On the other hand, for splitting tensile tests parallel to the direction of concreting, a significant improvement in tensile strength was observed with increasing fibre content (Figure 7b). For samples with 0.29% of fibres 35 mm and 45 mm long, the tensile strength increased by about 17%, and for the dosage equal to 0.87% it increased by 40% for CF-35 and by 66% for CF-45. For samples with a fibre length of 25 mm, the increase in tensile strength was smaller, equal to 9% for a fibre content of 0.29% and 24% for a fibre content of 0.87%. For all fibre lengths, a very small enhancement in tensile strength was noted between specimens with 0.29% and 0.58% of fibres. On the contrary, a large increase in tensile strength was observed when fibre content increased from 0.58% to 0.87%.

In the study in [66], the compression and flexural performance of steel fibre-reinforced concrete (SFRC) with normal-strength (NSF) and high-strength (HSF) steel fibres was evaluated. Depending on the fibre content and length, the flexural tensile strength f_L increased by up to 28% for NSF fibres and by up to 22.5% for HSF fibres. Additionally, the residual flexural tensile strength f_R increased by up to 27% for NSF fibres and by up to 96% for HSF fibres. Comparing these results with those obtained for the splitting tensile strength of CFRC, it is important to note that the benefits of using rCF fibres are comparable. The 66% increase in tensile strength demonstrates the applicability of rCF fibres in cement composites.

Regardless of the direction of concreting and fibre content, a large effect of fibre length on tensile strength was observed. In all cases, the tensile strength increased with increasing fibre length. The effectiveness of fibres with lengths equal to 35 mm and 45 mm was similar, however, greater than that of 25 mm fibres. In other words, the tensile strength of specimens CF-35 and CF-45 was significantly higher than that of specimen CF-25. Increasing the length of the rCF increased the load-carrying capacity and post-peak deformation, where the energy released in the fracture process was absorbed by the fibres.

3.4. Brittleness

Furthermore, while evaluating the strength parameters of brittle materials, it is important to determine the reciprocal ratio between the splitting tensile strength f_{ct} and the compressive strength f_{cc}, called the Brittleness Index (BI), calculated according to Formula (3):

$$BI = \frac{f_{ct}}{f_{cc}} \tag{3}$$

This is a measure of the material's ability to suddenly fail under acting forces without disproportionate deformations preceding this failure.

The average values of the BI are provided in Table 3, and Figure 8 shows graphs of the relationship between Brittleness Index enhancement and fibre content for different lengths depending on the direction of concreting: perpendicular or parallel.

The ratio of tensile to compressive strength for plain concrete was equal to f_{ct}/f_{cc} = 0.059, while for specimens with fibres, it was much higher. Analysing the data obtained, it can be concluded that the reference concrete had the highest brittleness, while the addition of fibres made the CFRCs more ductile. This was a result of the simultaneous increase in tensile strength and decrease in compressive strength, along with an increase in the amount and length of fibres. A large effect of the concreting direction was also noted. Namely, for the perpendicular direction (Figure 7a), the BI increased by a maximum of several percent for the highest fibre content of 0.87%. On the other hand, for the parallel direction, the BI enhancements were much larger and varied from 37% to 83% for the highest fibre content of 0.87%.

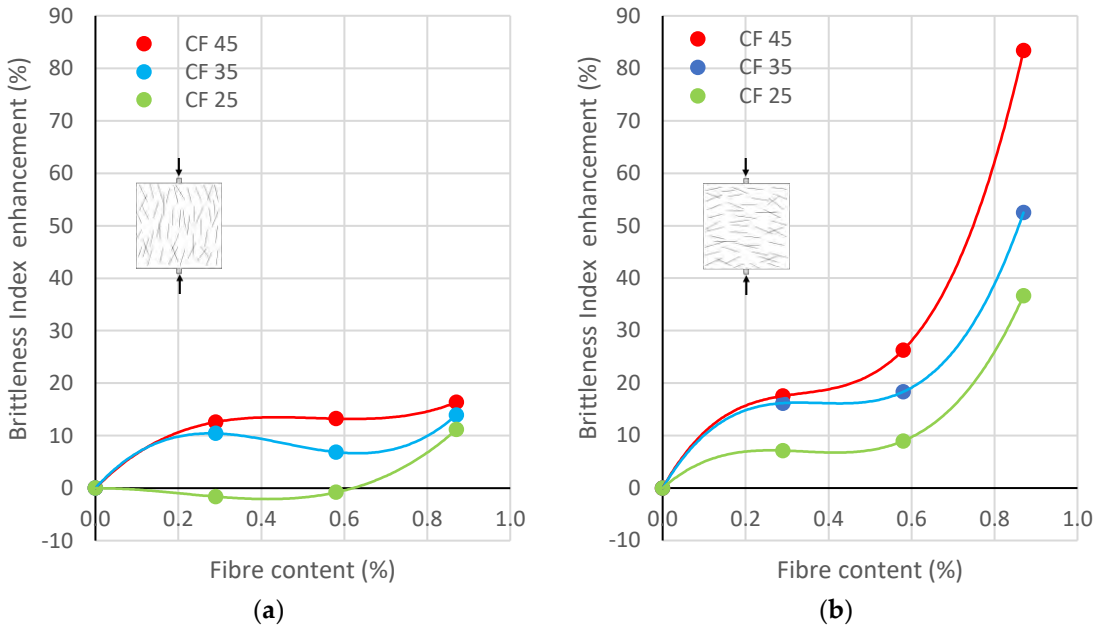


Figure 8. Brittleness Index enhancement vs. rCF content for different fibre lengths: (**a**) Perpendicular to the direction of concreting, (**b**) parallel to the direction of concreting.

3.5. Fracture Energy

As a measure of the tensile strength of CFRC, the energy required to completely damage the specimens was calculated as the area under the load–vertical displacement curve. The area up to a given value of deflection is the total mechanical energy per unit volume consumed by the material in deforming it to that value. The fracture energy *FE* was calculated using the formula:

$$FE = \sum \overline{F}_i \Delta d_i \quad (4)$$

where $\overline{F}_i$ is the average load at displacement increment Δd_i.

The average calculated fracture energies are presented in Table 3. Moreover, charts of the relationship between fracture energy enhancement and fibre content for samples with different fibre lengths and split parallel and perpendicular to the direction of concreting are shown in Figure 9.

The curve trend for fracture energy for specimens split parallel to the direction of concreting (Figure 9b) was similar to that of the tensile strength (Figure 7b) and the Brittleness Index (Figure 8b). However, the enhancements in the amount of required fracture energy were greater than those in the tensile strength. For example, for a 0.87% dosage of fibres with lengths of 25 mm, 35 mm, and 45 mm, the tensile strength increased by 16.7%, 21.8%, and 66.0%, respectively, while the fracture energy rose by 51.9%, 66.9%, and 132.2%, respectively. The difference was two to three times. These variations pointed to the large ultimate deformations of the specimens at failure, which resulted from the greater bridging efficiency of longer fibres. The increase in the amount of required fracture energy was a consequence of the fibres' ability to restrain the microcrack growth and to absorb energy by overcoming their pull-out.

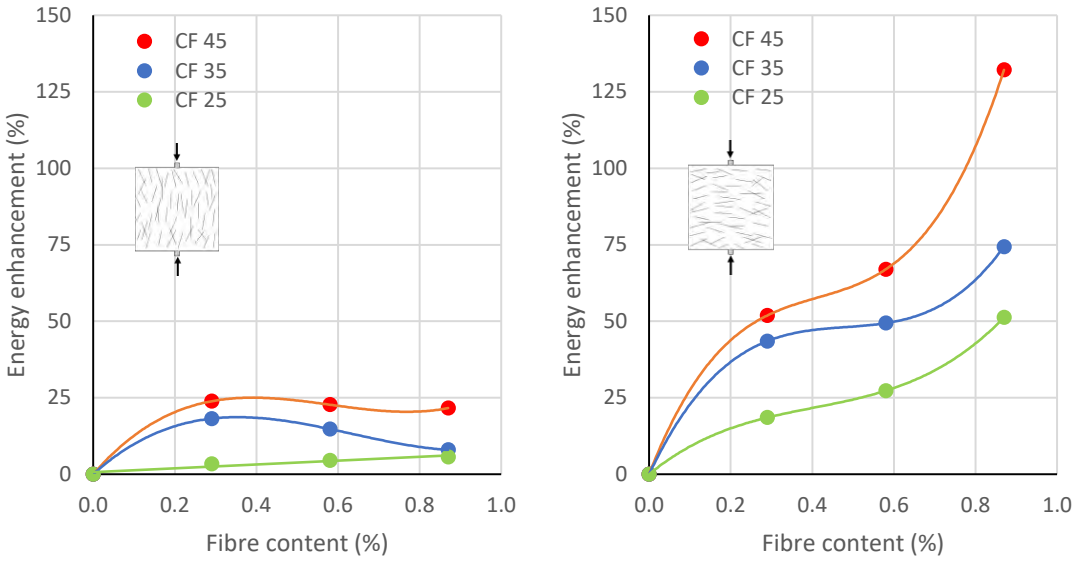
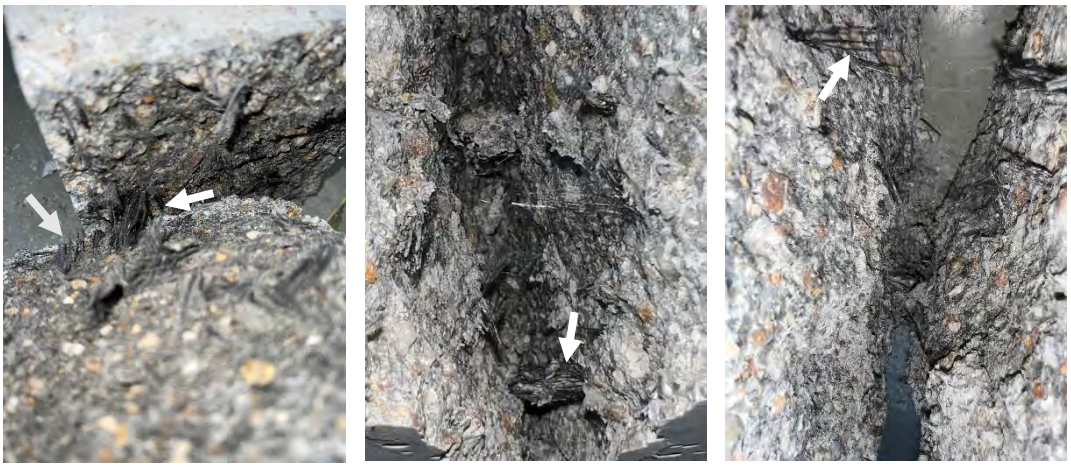


Figure 9. Energy enhancement vs. rCF content for different fibre lengths: (**a**) Perpendicular to the direction of concreting, (**b**) parallel to the direction of concreting.

3.6. Fracture Surface and Failure Mechanism

The effect of the rCF addition on the mechanical properties of CFRC was further examined based on the fracture surface images of the specimens after splitting. The analyses were conducted in order to determine the quantity and length of fibres that remained on the surfaces of the two halves of the specimens. Furthermore, their performance in transferring tensile forces was characterized by defining whether they ruptured or were pulled out from the concrete matrix.

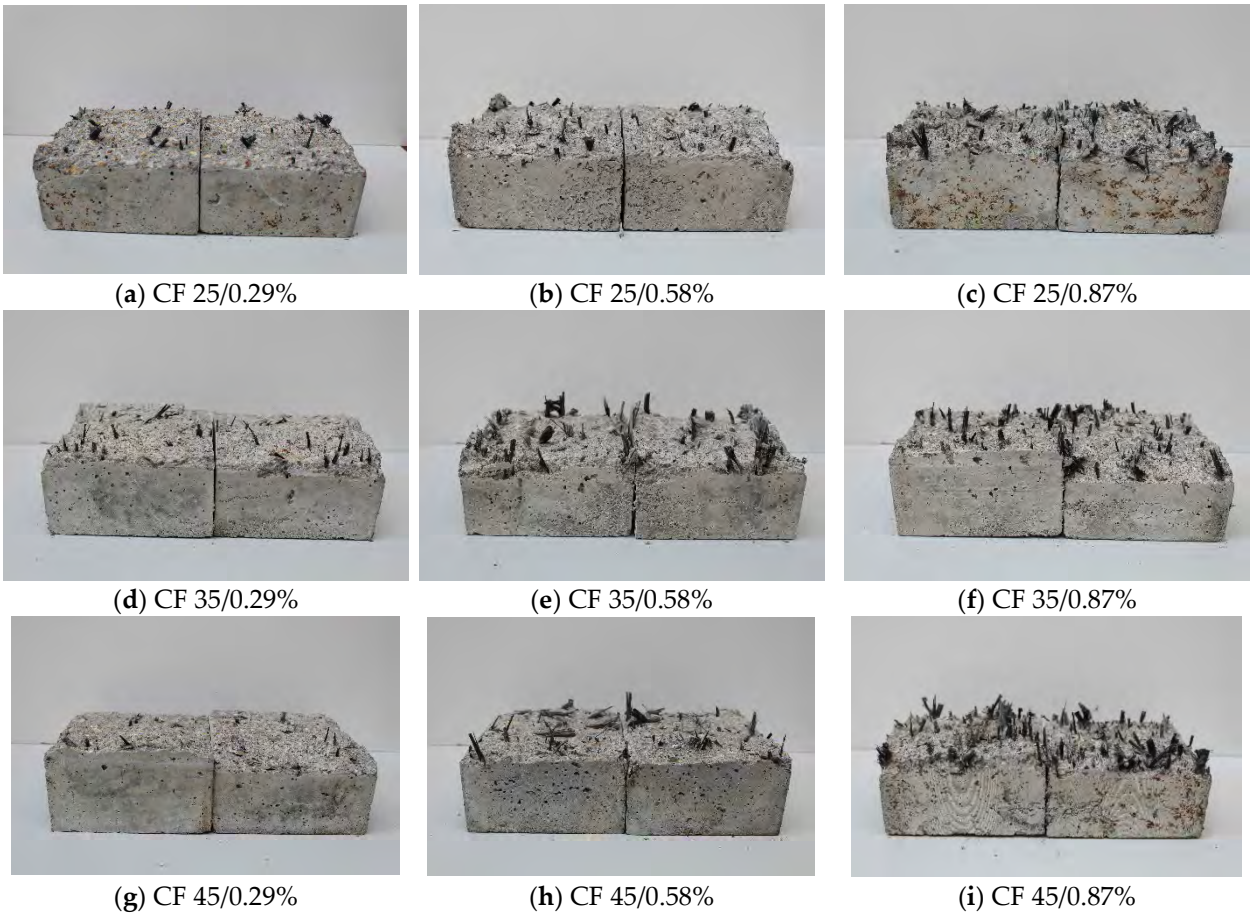
Figure 10 shows the fracture surfaces of three specimens split perpendicular to the direction of concreting for three fibre lengths corresponding to their highest dosage. About a dozen fibres with lengths ranging from a few to several millimetres were visible on the failure surfaces. The orientation angle of these fibres in relation to the cracking surface was very small and did not exceed 25°. Therefore, the crack bridging by the fibres was very limited, and hence only a slight increase in tensile strength, equal to less than 10%, was recorded (Figure 7a).



(**a**) CF 45/0.87 (**b**) CF 35/0.87% (**c**) CF 25/0.87%

Figure 10. Fracture surfaces of chosen samples, tested perpendicular to the direction of concreting.

Pictures of the failure surfaces of tensile specimens tested parallel to the direction of concreting are shown in Figure 11.



(**a**) CF 25/0.29% (**b**) CF 25/0.58% (**c**) CF 25/0.87%

(**d**) CF 35/0.29% (**e**) CF 35/0.58% (**f**) CF 35/0.87%

(**g**) CF 45/0.29% (**h**) CF 45/0.58% (**i**) CF 45/0.87%

Figure 11. Fracture surfaces of chosen samples, tested parallel to the direction of concreting.

It can be seen that the distribution of fibres on the failure surfaces was not uniform. Additionally, clusters of fibres were visible. This occurred because the carbon fibres were not thoroughly mixed or evenly distributed to create a uniform fibre network within the specimen, primarily due to the low consistency of the concrete mix. As expected, the smallest number of visible fibres was noted for samples with the lowest fibre content (0.29%), and the highest for specimens with the largest fibre content (0.87%). Moreover, the length of the fibres in the fracture plane depended on the original length of the fibre. The shortest fibres were seen in the cracked CF-25 specimens and the longest in the CF-45 specimens.

Based on the analysis of fibres present on the fracture surfaces of the specimens, it can be concluded that some of them ruptured, and some of the fibres were pulled out from the concrete matrix as a result of debonding (Figure 12).

The failure mechanism of fibres had a major effect on tensile strength and, consequently, the splitting force required to destroy the specimen. It seems that the bridging effectiveness of fibres, understood as an increase in tensile strength, was greater when the fibres ruptured than when they were pulled out of the matrix. Furthermore, they also contributed to increasing the deformability.

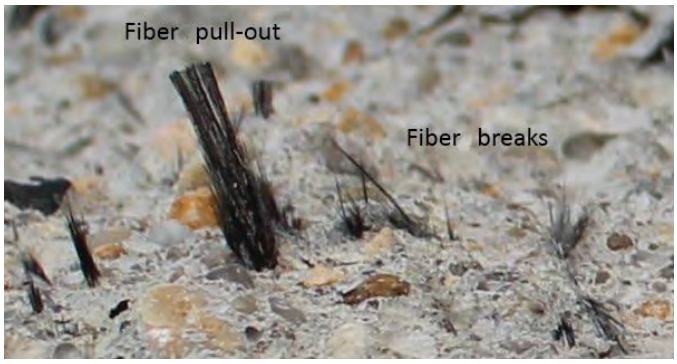


Figure 12. Fibre breakage and fibre pull-out in specimen CF 25.

Table 4 summarizes the results of the analysis of the fracture surfaces of the specimens split parallel to the concreting direction regarding the work of fibres that contributed to the transmission of tensile forces. The average number of fibres, their average and total length, and the mode of failure were determined.

Table 4. Fibres on the fracture surfaces for samples tested parallel to the direction of concreting.

Series ID	**CF 25**			**CF 35**			**CF 45**		
rCF (%)	0.29	0.58	0.87	0.29	0.58	0.87	0.29	0.58	0.87
l (mm)	8.4	10.1	11.0	10.5	13.6	13.8	15.8	16.3	16.9
$\Sigma\, l$ (mm)	412	596	904	461	796	1063	538	814	1285
n (pc)	49	59	82	44	58	77	34	50	76

Notations: rCF is fibre content, l is average fibre length, $\Sigma\, l$ is total fibre length, n is number of fibres.

It can be concluded that the number of fibres present on the failure surface was significantly dependent on fibre content and fibre length. The average fibre length l increased as their content and length increased. For CF-25 samples, the average fibre length varied between 8.4 mm and 11.0 mm, and for CF-35 samples it was between 10.5 mm and 13.8 mm, while for CF-45 it was between 15.8 mm and 16.9 mm. Similarly, the total fibre length Σl increased with fibre content and length. It ranged from 412 mm to 904 mm, 461 mm to 1063 mm, and 538 to 1285 mm for samples with fibre lengths of 25 mm, 35 mm, and 45 mm, respectively. The dependencies were different for the number of fibres n present on the fracture surfaces. Namely, with a decrease in used fibre length and content, the number of fibres n also decreased, i.e., for CF-25 (n = 49, 59, and 82 pcs), CF-35 (n = 44, 58, and 77 pcs), and CF-45 (n = 34, 50, and 76 pcs).

As previously mentioned, the failure mechanism of fibres present in the split specimens consisted of a combination of their rupture and pull-out from the matrix, with the pull-out being a dominant mode. Namely, the number of fibres pulled out from the matrix was greater than the number of fibres that ruptured.

4. Conclusions

The purpose of the experimental study was to understand the effect of the addition of recycled carbon fibres from wind turbine blades of different content and length on the concrete mechanical properties. Studies have shown that the direction of rCF orientation in relation to the applied tensile force has a decisive influence on the mechanical properties of CFRC, i.e., tensile strength, Brittleness Index, and fracture energy. The mechanical properties of CFRC split parallel to the direction of concreting were significantly better than those split perpendicular to the direction of concreting. The effectiveness of the fibres increased with increasing fibre content and length.

Moreover, it was concluded that the addition of rCFs slightly improved the mechanical properties of CFRC split perpendicular to the direction of concreting. Namely, the tensile strength was increased by a few to several percent up to a maximum of about 12%, the ductility—the Brittleness Index—grew by a maximum of 17%, and the fracture energy rose by a maximum of approximately 24%. On the other hand, the addition of rCFs significantly improved the mechanical properties of CFRC split parallel to the direction of concreting. It resulted in an increase in the splitting tensile strength from 10% to 66%, the Brittleness Index from 37% to 83%, and the fracture energy from 52% to 132%.

It was also concluded that the results obtained for the mechanical properties of CFRC were closely related to the behaviour and characteristics of the rCF, which were visible on the fracture surfaces of the tensile specimens. The number of fibres, their length, and the mode of fibre failure strongly influenced the tensile strength and hence the Brittleness Index and fracture energy. The obtained improvements in the concrete properties after the addition of carbon fibres were a result of their ability to resist the growth of microcracks and absorb fracture energy. The study showed that a combination of rCF pull-out and rupture in the transmission of tensile forces in the CFRC occurred. Namely, some of the fibres ruptured, and some of them were pulled out from the matrix, with the predominant failure mode being the pull-out.

Additionally, the results of the study showed that reinforcing concrete with rCFs of different content and lengths is effective from the mechanical point of view, on the condition that the correct direction of fibre orientation is assured. However, this strongly depends on the direction of concreting. It must also be highlighted that the increases in tensile strength obtained within this experimental campaign are in line with other studies from the literature review.

Finally, it is relevant to note that the research presented in this article is preliminary and cannot be considered an exhaustive work providing a full understanding of the effects of rCFs on the mechanical behaviour of concrete. Further research needs to be performed, taking into consideration the conclusions drawn from the performed tests. Namely, to improve the mechanical properties of CFRCs, the addition of fibres with higher roughness can be tested to ensure better interaction with the concrete matrix. Furthermore, plasticizers should be used to improve the workability of the concrete mixture and thus the efficiency of compaction. It will also lead to a more uniform fibre distribution and prevent cluster formation. Besides this, it is also advisable to test higher fibre contents and different fibre lengths. In addition, long-term tests should be carried out in order to characterize the rheological properties of CRFC and its environmental impact.

To sum up, the research results presented within the scope of this article, together with others available in the literature, can help to assess the feasibility of using recycled wind turbine blade waste in the construction industry. Undoubtedly, applying these research findings can contribute to lowering CO_2 emissions and preserving natural resources.

Author Contributions: Conceptualization, J.K. and F.S.; methodology, J.K. and F.S.; formal analysis, F.S.; investigation, J.K. and F.S.; resources, F.S.; data curation, F.S.; writing—original draft preparation, J.K.; writing—review and editing, J.K.; visualization, F.S.; supervision, J.K. and F.S.; project administration, J.K. and F.S.; funding acquisition, J.K. and F.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors on request.

Acknowledgments: Thanks to Andrzej Adamcio, owner of the company ANMET (https://www.anmet.com.pl/ (accessed on 2 October 2025)), for preparing and supplying the carbon fibres for the study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Upadhyayul, V.K.K.; Gadhamshatty, V.; Athanassiadis, D.; Tysklir, M.; Meng, F.; Pan, Q.; Cullen, J.M.; Yacout, D.M.M. Wind Turbine Blades Using Recycled Carbon Fibers: An Environmental Assessment. *Environ. Sci. Technol.* **2022**, *56*, 1267–1277. [CrossRef]
2. Mishnaewsky, L.; Beranner, K.; Petersen, H.N.; Beauson, J.; McGugan, M.; Sorensen, B.F. Materials for wind blades: An overview. *Materials* **2017**, *10*, 1285. [CrossRef]
3. Cooperman, A.; Eberle, A.; Lantz, E. Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options. *Resour. Conserv. Recycl.* **2021**, *168*, 105439. [CrossRef]
4. Recykling Albo Budownictwo. Drugie Życie Łopat Wiatrowych. Available online: https://zielonagospodarka.pl/recykling-albo-budownictwo-drugie-zycie-lopat-wiatrowych-1766 (accessed on 10 September 2025).
5. Newly Discovered Chemical Process Renders All Existing Wind Turbine Blades Recyclable. Available online: https://www.offshorewind.biz/2023/02/08/newly-discovered-chemical-process-renders-all-existing-wind-turbine-blades-recyclable/ (accessed on 1 October 2025).
6. Liu, P.; Barlow, C.Y. Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Manag.* **2017**, *62*, 229–240. [CrossRef]
7. Qureshi, J. A review of recycling methods for fibre reinforced polymer composites. *Sustainability* **2022**, *14*, 16855. [CrossRef]
8. Katnam, K.B.; Comer, A.J.; da Silva, L.F.M.; Young, T.M. Composite repair in wind turbine blades: An overview. *J. Adhes.* **2015**, *91*, 113–139. [CrossRef]
9. Karavida, S.; Peponi, A. Wind turbine blade waste circularity coupled with urban regeneration: A conceptual framework. *Energies* **2022**, *16*, 1464. [CrossRef]
10. Kwame, A.-F.; Akinlabi, E.T. Recycling of Fibre Reinforced Composites: A Review of Current Technologies. In Proceedings of the DII-2017 Conference on Infrastructure Development and Investment—Strategies for Africa, Livingstone, Zambia, 30 August–1 September 2017; pp. 157–167.
11. Oliveux, G.; Dandy, L.O.; Leeke, G.A. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Prog. Mater. Sci.* **2015**, *71*, 61–99. [CrossRef]
12. Zhang, J.; Chevali, V.S.; Wang, H.; Wang, C.H. Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling. *Compos. Part B Eng.* **2020**, *193*, 108053. [CrossRef]
13. Uliasz-Bocheńczyk, A.; Mokrzycki, E. The use of waste in cement production in Poland—The move towards sustainable development. *Arch. Civ. Eng.* **2022**, *38*, 67–81. [CrossRef]
14. Baturkin, D.; Hisseine, O.A.; Masmoudi, R.; Hamou, A.T.; Massicotte, L. Valorisation of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* **2021**, *174*, 1055807.
15. Correia, J.R.; Almeida, N.M.; Figueira, J.R. Recycling of FR P composites: Reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. *J. Clean. Prod.* **2011**, *19*, 1745–1753. [CrossRef]
16. Ogi, K.; Shinoda, T.; Mizui, M. Strength in concrete reinforced with recycled CFRP pieces. *Compos. Part A* **2005**, *36*, 893–902. [CrossRef]
17. Pham, T.M. Fibre-reinforced concrete: State-of-the-art-review on bridging mechanism, mechanical properties, durability, and eco-economic analysis. *Case Stud. Constr. Mater.* **2025**, *22*, e04574. [CrossRef]
18. Vairagade, V.S.; Dhale, S.A. Hybrid fibre reinforced concrete—A state of the art review. *Hybrid Adv.* **2023**, *3*, 100035. [CrossRef]
19. Akin, S.K.; Kartal, S.; Musevitoglu, A.; Sancioglu, S.; Zia, A.J.; Ilugun, A. Macro and micro polypropylene fiber effect on reinforced concrete beams with insufficient lap splice length. *Case Stud. Constr. Mater.* **2022**, *16*, e1005. [CrossRef]
20. Christopher, C.G.; Gopal, R.; Sadasivam, S.; Esaki, A.K.D.; Kumar, P.D. Experimental Toughness and Durability Evaluation of FRC Composite Reinforced with Steel–Polyester Fiber Combination. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* **2023**, *17*, 39. [CrossRef]
21. Xia, D.; Yu, S.; Feng, C.; Li, B.; Zheng, Z.; Wu, H. Damage characteristics of hybrid fiber reinforced concrete under the freeze-thaw cycles and compound-salt attack. *Case Stud. Constr. Mater.* **2023**, *18*, e01814. [CrossRef]
22. Khan, M.; Cao, M.; Xie, C.; Ali, M. Effectiveness of hybrid steel-basalt fiber reinforced concrete under compression. *Case Stud. Constr. Mater.* **2022**, *16*, e00941. [CrossRef]
23. Abade, A. Mechanical properties of hybrid fibre-reinforced concrete—Analytical modelling and experimental behaviour. *Mag. Concr. Res.* **2016**, *68*, 823–843. [CrossRef]

24. Ibrahim, A.M.; Abd, S.M.; Hussein, O.H.; Tayeh, B.A.; Najm, H.M.; Quaidi, S. Influence of adding short carbon fibers on the flexural behavior of textile-reinforced concrete one-way slab. *Case Stud. Constr. Mater.* **2022**, *17*, e01601. [CrossRef]
25. Das, S.; Sobuz, M.H.R.; Tam, V.W.; Akid, A.S.M.; Sutan, N.M.; Rahman, R.M. Effects of incorporating hybrid fibres on rheological and mechanical properties of fibre reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *262*, 120561. [CrossRef]
26. Behera, G.C.; Panda, S.; Kanda, P. Effect of length of fibers on mechanical properties of normal strength concrete. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2020**, *970*, 012020. [CrossRef]
27. Abdallah, S.; Fan, M.; Ress, D.W. Bonding mechanisms and strength of steel fiber–reinforced cementitious composites: Overview. *J. Mater. Civ. Eng.* **2018**, *30*, 04018001. [CrossRef]
28. Leporace-Guimil, B.; Mudadu, A.; Conforti, A.; Plizzari, G.A. Influence of fiber orientation and structural-integrity reinforcement on the flexural behavior of elevated slabs. *Eng. Struct.* **2022**, *252*, 113583. [CrossRef]
29. Han, B.; Zhang, L.; Zhang, C.; Wang, Y.; Yu, X.; Ou, J. Reinforcement effect and mechanism of carbon fibers to mechanical and electrically conductive properties of cement-based materials. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *125*, 479–489. [CrossRef]
30. Laranjeira, F.; Aquado, A.; Molins, C.; Grunewald, S.; Walraven, J.; Cavalaro, S. Framework to predict the orientation of fibers in FRC: A novel philosophy. *Cem. Concr. Res.* **2012**, *42*, 752–768. [CrossRef]
31. Ferrara, L.; Ozyurt, N.; di Prisco, M. High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: The role of "casting-flow induced" fibre orientation. *Mater. Struct.* **2011**, *44*, 109–128. [CrossRef]
32. Li, F.-Y.; Li, L.-Y.; Dang, Y.; Wu, P.-F. Study of the effect of fibre orientation on artificially directed steel fibre-reinforced concrete. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2018**, *2018*, 8657083. [CrossRef]
33. Marcalikova, Z.; Cajka, R.; Bilek, V.; Bujdos, D.; Suchara, O. Determination of mechanical characteristics for fiber-reinforced concrete with straight and hooked fibers. *Crystals* **2020**, *10*, 545. [CrossRef]
34. Lameiras, R.; Barros, J.A.O.; Azenha, M. Influence of casting condition on the anisotropy of the fracture properties of steel fibre reinforced self-compacting concrete (SFRSCC). *Cem. Concr. Coposites* **2015**, *59*, 60–76. [CrossRef]
35. Di Prisco, M.; Plizzari, G.; Vandewalle, L. Fibre reinforced concrete: New design perspectives. *Mater. Struct.* **2009**, *42*, 1261–1281. [CrossRef]
36. Meng, F.; Olivetti, E.A.; Zhao, Y.; Chang, J.C.; Pickering, S.J.; McKechnie, J. Comparing life cycle energy and global warming potential of carbon fiber composite recycling technologies and waste management option. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2018**, *6*, 9854–9865. [CrossRef]
37. Meng, F.; McKechnie, J.; Turner, T.A.; Pickering, S.J. Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibre. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **2017**, *100*, 206–214. [CrossRef]
38. Pimenta, S.; Pinho, S.T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Manag.* **2011**, *31*, 378–392. [CrossRef]
39. Smoleń, J.; Olesik, P.; Jała, J.; Adamcio, A.; Kurtyka, K.; Godzierz, M.; Kozera, R.; Kozioł, M.; Boczkowska, A. The use of carbon fibers recovered by pyrolysis from end-of-life wind turbine blades in epoxy-based composite panels. *Polymers* **2022**, *14*, 2925. [CrossRef]
40. Ren, Y.; Xu, L.; Shang, X.; Shen, Z.; Fu, R.; Guo, W.L. Evaluation of mechanical properties and pyrolysis products of carbon fibers recycled by microwave pyrolysis. *ACS Omega* **2022**, *7*, 13529–13537. [CrossRef]
41. Muley, P.; Varpe, S.; Ralwani, R. Chopped carbon fibers innovative material for enhancement of concrete performances. *Int. J. Sci. Eng. Appl. Sci.* **2015**, *1*, 164–169.
42. Upadhyay, A.; Pandey, A.; Singh, C.; Bhardwaj, D. To study feasibility of carbon fiber in concrete. *Int. Res. J. Eng. Technol.* **2020**, *7*, 7161–7164.
43. Li, Y.-F.; Li, J.-Y.; Ramanathan, G.K.; Chang, S.-M.; Shen, M.-Y.; Tsai, Y.-K.; Huang, C.-H. An Experimental Study on Mechanical Behaviors of Carbon Fiber and Microwave-Assisted Pyrolysis Recycled Carbon. *Sustainability* **2021**, *13*, 6829. [CrossRef]
44. Mello, E.; Ribellato, C.; Mohamedelhassan, E. Improving concrete properties with fibers addition. *Int. J. Civ. Environ. Eng.* **2014**, *8*, 249–254.
45. Gull, I.; Tantray, M.A. Effect of super plasticizers on fresh and hardened state properties of short carbon fiber reinforced electrically conductive concrete. *Int. J. Recent Technol. Eng.* **2020**, *8*, 2644–2650. [CrossRef]
46. Ghanem, S.; Bowling, J. Mechanical properties of carbon-fiber–reinforced concrete. *Adv. Civ. Eng. Matls* **2019**, *8*, 224–234. [CrossRef]
47. Jena, B.; Patel, A. Study on the mechanical properties and microstructure of chopped carbon fiber reinforced self-compacting concrete. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* **2016**, *7*, 223–231.
48. Liu, G.-J.; Bai, E.-L.; Xu, J.-Y.; Yang, N. Mechanical properties of carbon fiber-reinforced polymer concrete with different polymer–cement ratios. *Materials* **2019**, *12*, 3530. [CrossRef]
49. Rangekov, M.; Nassiri, S.; Haselbach, L.; Englund, K. Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *126*, 875–885. [CrossRef]

50. Park, S.-J.; Seo, M.-K.; Shim, H.-B.; Rhee, K.-Y. Effect of different cross-section types on mechanical properties of carbon fibers-reinforced cement composites. *Mater. Sci. Eng. A* **2004**, *366*, 348–355. [CrossRef]
51. Li, V.V.; Obla, K.H. Effect of fiber length variation on tensile properties of carbon-fiber cement composites. *Compos. Eng.* **1994**, *4*, 947–996. [CrossRef]
52. Faneca, G.; Segura, I.; Torrents, J.M.; Aguado, A. Development of conductive cementitious materials using recycled carbon fibres. *Cem. Concr. Compos.* **2018**, *92*, 135–144. [CrossRef]
53. Patchen, A.; Young, S.; Penumadu, D. An investigation of mechanical properties of recycled carbon fiber reinforced ultra-high-performance concrete. *Materials* **2023**, *16*, 314. [CrossRef]
54. Vitale, P.; Napolitano, R.; Colella, R.; Menna, C.; Asprone, D. Cement-matrix composites using CFRP waste: A circular economy perspective using industrial symbiosis. *Materials* **2023**, *14*, 1484. [CrossRef]
55. Nguyen, H.; Carvelli, V.; Fujii, T.; Okubo, K. Cement mortar reinforced with reclaimed carbon fibres, CFRP waste or prepreg carbon waste. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *126*, 321–331. [CrossRef]
56. Hao, Y.; Shi, C.; Bi, Z.; Lai, Z.; She, A.; Yao, W. Recent advances in properties and applications of carbon fiber-reinforced smart cement-based composites. *Materials* **2023**, *16*, 2552. [CrossRef]
57. Anmet. Available online: https://www.anmet.com.pl// (accessed on 2 October 2025).
58. *PN-EN 12350-2:2019*; Testing Fresh Concrete. Part 2: Slump Test. Polski Komitet Normalizacyjny: Warsaw, Poland, 2014.
59. *PN-EN 206:2014*; Concrete. Specification, Performance, Production And Conformity. Polski Komitet Normalizacyjny: Warsaw, Poland, 2014.
60. Figueiredo, A.D.; Ceccato, M.R. Workability analysis of steel fiber reinforced concrete using slump and Ve-Be test. *Mater. Res.* **2015**, *18*, 1284–1290. [CrossRef]
61. *PN-EN 12390-3:2019*; Testing Hardened Concrete. Part 3: Compressive Strength Of Test Specimens. Polski Komitet Normalizacyjny: Warsaw, Poland, 2014.
62. *PN-EN 12390-6:2011*; Testing Hardened Concrete. Part 6: Tensile Strength in Splitting of Test Specimens. Polski Komitet Normalizacyjny: Warsaw, Poland, 2014.
63. Muthkumarana, T.V.; Arachchi, M.A.V.H.M.; Somarathna, H.M.C.C.; Raman, S.N. A review on the variation of mechanical properties of carbon fibre-reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *366*, 130173. [CrossRef]
64. Zheng, R.; Pang, J.; Sun, J.; Su, Y.; Xu, G. Damage model of carbon-fiber-reinforced concrete based on energy conversion principle. *J. Compos. Sci.* **2024**, *8*, 71. [CrossRef]
65. Carrera, K.; Kunzel, K.; Papez, V.; Sovjak, R.; Kheml, P.; Fornusek, J.; Mara, M.; Konrad, P. Flexural strength of fibre reinforced concrete in relation to the angle of magnetically orientated fibres. *MATEC Web Conf.* **2022**, *364*, 05017. [CrossRef]
66. Jin, A.-H.; Woo, J.-S.; Yun, H.-D.; Kim, S.-W.; Park, W.-S.; Choi, W.-C. Influence of concrete strength and fiber properties on residual flexural strength of steel fiber-reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* **2025**, *489*, 142366. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Original research paper (Oryginalny artykuł naukowy)

mgr inż. Filip Szmatuła [1)]
ORCID: 0000-0001-9725-1540

Assessment of the impact of SBR rubber waste on selected properties of cement concrete

Ocena wpływu odpadów gumowych SBR na wybrane właściwości betonu cementowego

DOI: 10.15199/33.2025.12.01

Abstract. The article presents an assessment of the influence of shredded SBR rubber waste on the properties of C20/25 cement concrete. Tests were carried out on mixtures containing 0%, 5%, 10%, and 20% rubber granulate relative to the total concrete volume. The results showed a decrease in compressive strength and elastic modulus with increasing rubber content, accompanied by improved frost resistance and thermal insulation. Rubber content up to 10% did not significantly affect water absorption or penetration depth. The obtained results confirm the feasibility of using rubber waste in concrete to enhance its thermal insulation properties.

Keywords: recycling; SBR rubber waste; concrete; use of waste materials in concrete; durability; frost resistance; thermal conductivity; strength.

Streszczenie. W artykule przedstawiono ocenę wpływu rozdrobnionych odpadów gumowych SBR na właściwości betonu cementowego klasy C20/25. Przeprowadzono badania mieszanek zawierających 0, 5, 10 i 20% granulatu gumowego w stosunku do objętości całkowitej betonu. Wyniki wykazały zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości wraz ze wzrostem ilości gumy przy jednoczesnej poprawie mrozoodporności oraz izolacyjności cieplnej betonu. Zawartość do 10% odpadów gumowych nie miała istotnego wpływu na nasiąkliwość i głębokość penetracji wody. Uzyskane rezultaty potwierdzają możliwość wykorzystania tego typu odpadów w betonach w celu poprawy ich izolacyjności cieplnej.

Słowa kluczowe: recykling; odpady z gumy SBR; beton; zastosowanie odpadów w betonie; trwałość; mrozoodporność; przewodność cieplna; wytrzymałość.

Improper rubber waste management leads to serious environmental problems, including environmental pollution, excess waste in landfills, inability to process rubber waste, and the risk of fires. In response to these challenges, and due to the limited resources of natural aggregates (e.g., sand, gravel), which are the basic ingredients used in construction, it has become necessary to develop effective methods for managing rubber waste. One possible solution is to use rubber in the form of dust, fines, or granules as a partial replacement for natural aggregate in the production of mortars and cement concrete [1 – 8] as well as asphalt mixes [9 – 11]. This approach aligns with the concept of sustainable construction, simultaneously reducing the amount of rubber waste released into the environment and reducing the demand for primary raw materials.

Despite its environmental benefits, the introduction of crushed rubber into concrete poses technological challenges. Studies have shown that this type of addition negatively affects the basic mechanical properties of concrete [1 – 8]. Namely, a reduction in compressive strength is observed, proportional to the increase in the percentage of rubber in the mix. On the other hand, cement concrete with crushed rubber has favorable performance properties, making it an attractive material for applications requiring specific parameters. This material exhibits high energy absorption capacity, improved fatigue resistance, good thermal and acoustic properties, and high

Niewłaściwe gospodarowanie odpadami gumowymi prowadzi do poważnych problemów ekologicznych wpływających na zanieczyszczenie środowiska, nadmiar odpadów na składowiskach, brak możliwości przetworzenia gumowych odpadów i ryzyko pożarów. W odpowiedzi na te wyzwania, a także ze względu na ograniczone zasoby kruszyw naturalnych (np. piasek, żwir) stanowiących podstawowe składniki stosowane w budownictwie, konieczne stało się opracowanie skutecznych sposobów zagospodarowania odpadów gumowych. Jednym z możliwych rozwiązań jest ich wykorzystanie w postaci pyłu, miału lub granulatu jako częściowego zamiennika kruszywa naturalnego w produkcji zapraw i betonu cementowego [1 – 8] oraz mieszanek mineralno-asfaltowych [9 – 11]. Takie podejście wpisuje się w ideę zrównoważonego budownictwa, umożliwiając jednocześnie ograniczenie ilości odpadów gumowych trafiających do środowiska oraz zmniejszenie zapotrzebowania na surowce pierwotne.

Pomimo korzyści środowiskowych wprowadzenie rozdrobnionej gumy do betonu wiąże się z wyzwaniami technologicznymi. Badania wykazały, że tego typu dodatek negatywnie wpływa na podstawowe właściwości mechaniczne betonu [1 – 8]. Obserwuje się zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie, proporcjonalne do wzrostu procentowej zawartości gumy w mieszance. Z drugiej strony beton cementowy z dodatkiem rozdrobnionej gumy charakteryzuje się korzystnymi właściwościami użytkowymi, co czyni go atrakcyjnym materiałem w zastosowaniach wymagających specyficznych parametrów. Materiał ten wykazuje

[1)] Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Budownictwa; t.szmatula@ib.uz.zgora.pl

water and frost resistance [1–8]. Current research activities focus on selecting the appropriate grain size and amount of crushed rubber in concrete to limit its negative impact on strength.

A review of the literature reveals that most existing research focuses on concrete containing rubber granulate obtained from used car tires. This is justifiable, as used tires constitute approximately 80% of all rubber waste. Additionally, the continued growth of the automotive industry increases the amount of rubber products. Therefore, I conducted a study on concrete incorporating crushed rubber waste derived from the automotive industry (both post-production and end-of-life tires) as well as from household appliances. The aim of the research presented in this article was to assess the properties of cement concrete containing this type of rubber waste.

Materials and methods

The research program included the modification of the reference concrete with the addition of SBR rubber granulate with a grain size of 1 – 4 mm, which was obtained from post-production waste from the automotive industry, crushed to the appropriate fraction.

It was added to the concrete mix by volume, simultaneously reducing the content of individual components. Three different concrete mixes were prepared, containing 5, 10, and 20% of crushed rubber waste, and a mix without the waste (reference). The following designations were adopted for the tested mixes: C0 – reference, and C5, C10, and C20 with crushed rubber in amounts of 5, 10, and 20% of the concrete volume, respectively. The concrete was designed as standard C20/25 class concrete. The composition of the concrete mix is presented in Table 1. Portland cement CEM I 42.5 R, gravel (2/8 and 8/16 mm), washed sand 0/2 mm, and fly ash were used to prepare the concrete mix. A superplasticizer was also added. The water-cement ratio was assumed to be 0.56. Concrete mixtures were prepared in the Construction Laboratory of the Institute of Civil Engineering, University of Zielona Góra. From each

dużą zdolność do absorpcji energii, poprawia odporność na zmęczenie, wykazuje dobre właściwości cieplne i akustyczne oraz dużą odporność na działanie wody i mrozu [1 – 8]. Obecne działania badawcze koncentrują się na doborze odpowiedniego uziarnienia oraz ilości rozdrobnionej gumy w betonie, tak aby ograniczyć jej negatywny wpływ na wytrzymałość.

Z przeglądu literatury wynika, że większość dotychczasowych badań dotyczy betonu z udziałem granulatu gumowego pozyskanego ze zużytych opon samochodowych. Jest to zrozumiałe, ponieważ zużyte opony stanowią ok. 80% wszystkich odpadów gumowych. Stały rozwój motoryzacji zwiększa jednak również ilość wyrobów z gumy. W związku z tym podjąłem się badania betonu z dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych, pochodzących z branży motoryzacyjnej (gumowe odpady poprodukcyjne i poużytkowe) oraz ze sprzętów AGD. Celem badań, których wyniki przedstawiono w artykule, była ocena właściwości betonu cementowego z dodatkiem tego rodzaju odpadów gumowych.

Materiały i metody badań

Program badań obejmował modyfikację betonu referencyjnego dodatkiem granulatu gumowego SBR o uziarnieniu 1 – 4 mm, który uzyskano z odpadów poprodukcyjnych z branży motoryzacyjnej, rozdrobnionych do odpowiedniej frakcji.

Dodawano go do mieszanki betonowej objętościowo, zmniejszając jednocześnie zawartość poszczególnych składników. Przygotowano trzy różne mieszanki betonowe zawierające 5, 10 i 20% rozdrobnionych odpadów gumowych oraz mieszankę bez dodatku odpadów (referencyjna). Przyjęto następujące oznaczenia badanych mieszanek: C0 – referencyjna oraz C5, C10 i C20 z rozdrobnioną gumą odpowiednio w ilości 5, 10 i 20% w stosunku do objętości betonu. Beton zaprojektowano jako zwykły klasy C20/25. Skład mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 1. Do sporządzenia mieszanki betonowej zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R, żwir (2/8 i 8/16 mm), piasek płukany 0/2 mm oraz popiół lotny. Dodawano również superplastyfikator. Współczynnik wodno-cementowy przyjęto na poziomie 0,56. Mieszanki betonowe przygotowano w Laborato-

Table 1. Composition of the concrete mixes C0, C5, C10, C20 per 1 m^3
Tabela 1. Skład mieszanek betonowych C0, C5, C10, C20 na 1 m^3

Material name/Nazwa materiału	Composition of the concrete mixes [kg/m^3]/Skład mieszanki betonowej [kg/m^3]			
	C0 (0% rubber)/ C0 (0% gumy)	C5 (5% rubber)/ C5 (5% gumy)	C10 (10% rubber)/ C10 (10% gumy)	C20 (20% rubber)/ C20 (20% gumy)
Superplasticizer/Superplastyfikator	2,16	2,05	1,94	1,72
Water/Woda	150	142	135	120
Cement CEM I 42,5R	270	256	243	216
Sand 0/2 mm/Piasek 0/2 mm	850	807	765	680
Aggregate 2/8 mm/Kruszywo 2/8 mm	500	475	450	400
Aggregate 8/16 mmKruszywo 8/16 mm	570	541	513	456
Fly ash/Popiół lotny	75	71	67,5	60
SBR rubber granulate/Guma SBR granulat	–	27,5	55	110

mixture series, 9 cubic samples with dimensions of 150 x 150 x 150 mm and 12 cubic samples with dimensions of 100 x 100 x 100 mm, as well as 3 cylindrical samples with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm were prepared. For each concrete mixture, its consistency was determined by the slump method in accordance with PN-EN 12350-2:2019-07 [12], density in accordance with PN-EN 12350-6:2019-08 [13], and air content by the pressure method in accordance with PN-EN 12350-7:2019-08 [14].

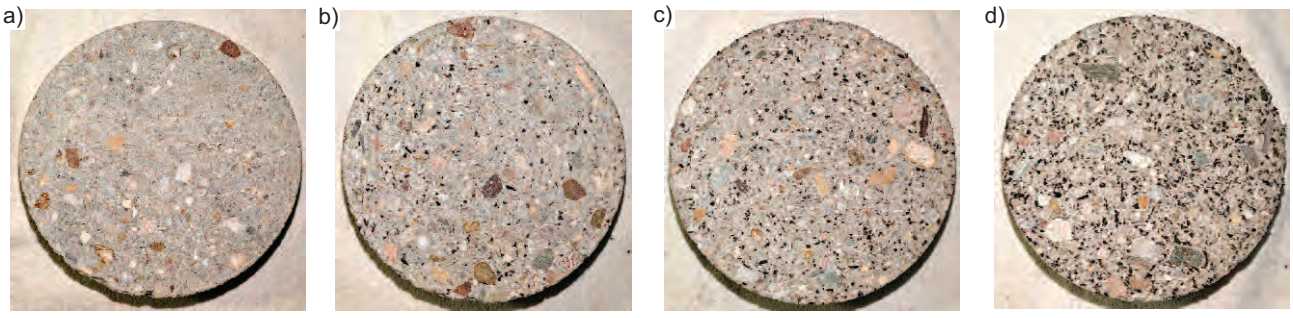
All series of tested mixtures were prepared in accordance with the PN-EN 12390-2:2019-07 standard [15]. The same sequence of component dosing and mixing time were maintained. The concrete mixture was compacted in the molds on a vibrating table. After 24 hours, the samples were demoulded and placed in water at a temperature of 20°C. Concrete compressive strength was determined in accordance with the PN-EN 12390-3:2019-07 standard [16], after 2, 28, and 56 days of sample curing. Subsequently, water absorption was tested according to PN-88/B-06250 [17] and bulk density based on PN-EN 12390-7:2019-08 [18]. The depth of water penetration under pressure was determined according to PN-EN 12390-8:2019-08 [19] after 28 days of curing, while the frost resistance was tested using 150 freeze-thaw cycles according to PN-B-06265:2022-08 [20] on samples cured for 28 days. The photograph shows the surface of the sample after cutting.

Based on a visual assessment of the sample surfaces, it was determined that the crushed rubber was evenly distributed throughout the concrete structure. In addition to the standard parameters of the cement concrete, the thermal conductivity coefficient was also determined using a FOX plate apparatus at a temperature of 20°C. The sample dimensions were 100 x 100 mm, with a thickness of 100 mm. The top and bottom surfaces were ground to achieve parallelism and flatness.

rium Budowlanym Instytutu Budownictwa Uniwersytetu Zielonogórskiego. Z każdej serii mieszanki wykonano 9 próbek sześciennych o wymiarach 150 x 150 x 150 mm i 12 próbek o wymiarach 100 x 100 x 100 mm oraz 3 próbki walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. W przypadku każdej mieszanki betonowej określono jej konsystencję metodą opadu stożka zgodnie z PN-EN 12350-2:2019-07 [12], gęstość zgodnie z PN-EN 12350-6:2019-08 [13] oraz zawartość powietrza metodą ciśnieniową wg PN-EN 12350-7:2019-08 [14].

Wszystkie serie badanych mieszanek przygotowano zgodnie z normą PN-EN 12390-2: 2019-07 [15]. Zachowano identyczną kolejność dozowania składników i czas mieszania. Mieszankę betonową zagęszczano w formach na stoliku wibracyjnym. Po upływie 24 h próbki zostały rozformowane i umieszczone w wodzie o temperaturze 20°C. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie betonu wykonano zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2019-07 [16], po 2, 28 i 56 dniach dojrzewania próbek. W dalszej kolejności przeprowadzono badanie nasiąkliwości wg PN-88/B-06250 [17] i gęstości objętościowej na podstawie PN-EN 12390-7:2019-08 [18]. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem wykonano wg PN-EN 12390-8:2019-08 [19] po 28 dniach dojrzewania, a mrozoodporność określono, stosując 150 cykli zamrażania i rozmrażania wg PN-B-06265:2022-08 [20] na próbkach dojrzewających przez 28 dni. Widok powierzchni próbek po przecięciu przedstawiono na fotografii. Na podstawie oceny wizualnej powierzchni próbek stwierdzono, że dodatek rozdrobnionej gumy jest równomiernie rozmieszczony w strukturze betonu.

Oprócz standardowych parametrów betonu cementowego określono również współczynnik przewodzenia ciepła, w aparacie płytowym FOX, w temperaturze 20°C. Wymiary próbek wynosiły 100 x 100 mm, a ich grubość 100 mm. Powierzchnię górną i dolną zeszlifowano w celu uzyskania ich równoległości i równości.



Surface of concrete samples without and with the addition of crushed rubber waste: a) 0%; b) 5%; c) 10%; d) 20%
Powierzchnia próbek betonu bez i z dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych: a) 0%; b) 5; c) 10%; d) 20%

Results and discussion

All concrete mixtures, regardless of the added amount of SBR rubber, demonstrated a uniform distribution of the additive within the structure. Mix test results are presented in Table 2.

The density of the concrete mixture varied significantly with the increasing content of rubber in each mix. The maximum difference in density was 470 kg/m^3. The 5% of rubber addition increased the fluidity of the concrete

Wyniki badań i ich analiza

Wszystkie mieszanki betonowe, niezależnie od ilości dodatku gumy SBR, wykazały jednorodne rozmieszczenie dodatku w strukturze. Wyniki badań mieszanki zamieszczono w tabeli 2.

Gęstość mieszanki betonowej zmieniała się znacznie wraz ze wzrostem ilości dodatku gumy w poszczególnych mieszankach. Maksymalna różnica gęstości wynosiła 470 kg/m^3. Pięcioprocentowy dodatek gumy spowodował zwiększenie ciekłości mieszanki betonowej w porównaniu z próbką referencyjną. Po-

Table 2. Test results of the concrete mixture modified with SBR rubber
Tabela 2. Wyniki badań mieszanki betonowej modyfikowanej gumą SBR

Concrete mix/ Mieszanka betonowa	Concrete mix density [kg/m^3]/ Gęstość mieszanki betonowej [kg/m^3]	Concrete mix consistency [mm]/ Konsystencja mie-szanki betonowej [mm]	Air content in the concrete mix [%]/ Zawartość powietrza w mieszance betonowej [%]
C0	2240	50 (S2)	5,5
C5	2030	130 (S3)	12,0
C10	1960	70 (S2)	12,5
C20	1770	80 (S2)	20,0

mix compared to the reference sample. However, the remaining samples, containing rubber additions of 10 and 20% by volume, did not exhibit significantly higher fluidity.

All mixtures modified with SBR rubber exhibited high air content during the pressure gauge test. This can be attributed to the high rubber content, a significant reduction in the concrete density, and the influence of the rubber addition on the concrete's behavior during testing, including its ability to deform under pressure in the air gauge. Figure 1 presents the results of the concrete compressive strength with and without the addition of crushed rubber waste.

Based on the obtained compressive strength test results, it was found that the incorporation of rubber granulate into concrete reduced its strength.

The lowest compressive strength was observed for the concrete with 20% of crushed rubber waste, regardless of the curing time. After 28 days of curing, its strength decreased by as much as 86.9% compared to the reference concrete. With 5% and 10% of crushed rubber in the concrete, the decrease was smaller, reaching 52.1% and 61.0%, respectively. Only the reference concrete achieved the designed compressive strength class after 28 days of curing.

The water absorption of the concrete containing the crushed rubber additive and the reference concrete was 5.8 – 7.0%. The reference sample achieved a water absorption by weight equal to 6.3%. The sample with a 5% of rubber additive achieved the highest water absorption of 7.0%, while the

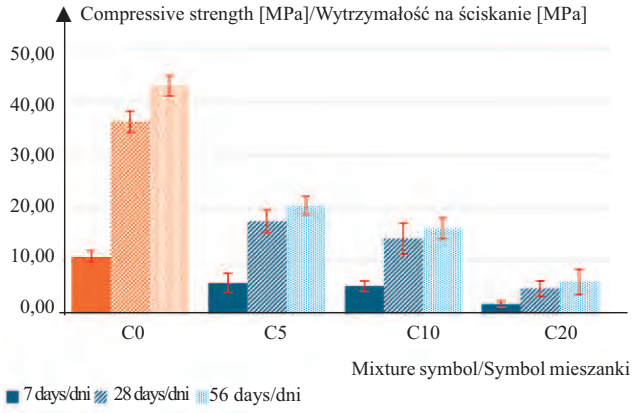


Fig. 1. Compressive strength of concrete without and with the addition of crushed rubber waste after 7, 28 and 56 dyas of curing
Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie betonu bez i z dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych po 7, 28 i 56 dniach dojrzewania

zostałe próbki zawierające dodatek gumy na poziomi 10 i 20% objętości nie wykazywały znacznie większej ciekłości.

Wszystkie mieszanki modyfikowane dodatkiem gumy SBR charakteryzowała duża zawartość powietrza podczas wykonywania próby metodą ciśnieniomierza. Może to być związane z dużą zawartością gumy, ze znacznym zmniejszeniem gęstości mieszanki betonowej oraz wpływem dodatku gumy na zachowanie się betonu podczas wykonywania próby, w tym zdolności do odkształcania się podczas wywierania ciśnienia w aparacie do badania zawartości powietrza w mieszance betonowej. Na rysunku 1 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie betonu bez i z dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych.

Na podstawie uzyskanych wyników badań wytrzymałości na ściskanie stwierdzono, że wprowadzenie granulatu gumowego do betonu spowodowało zmniejszenie jego wytrzymałości. Najmniejszą wytrzymałością na ściskanie charakteryzował się beton z dodatkiem 20% rozdrobnionych odpadów gumowych niezależnie od czasu dojrzewania. Po 28 dniach dojrzewania odnotowano spadek jego wytrzymałości aż o 86,9% w porównaniu z betonem referencyjnym. Przy ilości rozdrobnionej gumy w betonie 5% i 10% spadek jest mniejszy i wynosi odpowiednio 52,1 i 61,0%. Tylko w przypadku betonu referencyjnego udało się uzyskać projektowaną klasę wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.

Nasiąkliwość betonu zawierającego dodatek rozdrobnionej gumy oraz betonu referencyjnego wynosiła 5,8 – 7,0%. Próbka referencyjna uzyskała nasiąkliwość wagową równą 6,3%. Próbka z dodatkiem gumy na poziomie 5% uzyskała największą nasiąkliwość równą 7,0%, a próbki zawierające 10 i 20% gumy na poziomie 5,8 i 6,2%. Wyniki pomiaru głębokości penetracji wody pod ciśnieniem przedstawiono na rysunku 2.

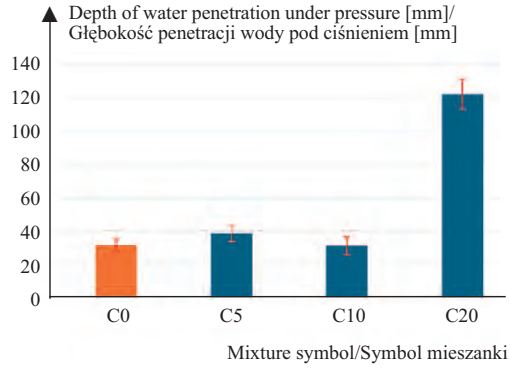


Fig. 2. Depth of water penetration under pressure in concrete without and with the addition of crushed rubber waste
Rys. 2. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem w betonie bez i z dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych

samples containing 10% and 20% of rubber achieved 5.8 and 6.2% respectively. The results of the water penetration depth measurements are shown in Figure 2.

The greatest water penetration depth was achieved in the case of concrete containing 20% of crushed rubber waste (123 mm – which is a four times greater than that of C0). With lower contents of crushed rubber in the concrete (5 and 10%), the maximum penetration depth of water under pressure was equal to 39 mm – a 24% increase compared to C0, and 31 mm – no increase compared to C0, respectively. The depth of water penetration into the reference concrete was 31 mm.

Frost resistance testing of concretes with the addition of crushed rubber and the reference concrete was performed after 150 freezing and thawing cycles (Figures 3). The standard requirement for evaluating compliance with the F150 frost resistance grade consists of fulfilling three criteria simultaneously according to PN-B-06265:2022-08 [20].

The addition of crushed rubber to concrete, regardless of its dosage, did not adversely affect its frost resistance. Compared to the reference concrete, the samples containing rubber waste showed a smaller decrease in compressive strength after 150 cycles. All tested concretes showed a mass increase after 150 freeze-thaw cycles. For the reference concrete, this increase was equal to 0.1%, while for the concretes with crushed rubber, it was 0.3 ÷ 0.6% (the higher the crushed rubber content, the smaller the increase). The samples exhibited no cracking.

Modulus of elasticity of concrete with the addition of crushed rubber waste after 28 days of curing is clearly lower than that of the reference concrete (Figure 4). The test was performed in accordance with the PN-EN 12390-13 standard. However, no significant decrease in the modulus of elasticity was observed in the concretes modified with 5, 10, and 20% of the rubber waste. The ratio of the modulus of elasticity to the compressive strength increased with increasing amount of the additive in the individual mixes. The percentage decrease in the modulus of elasticity compared

Największą głębokość penetracji wody uzyskano w przypadku betonu zawierającego 20% rozdrobnionych odpadów gumowych (123 mm – zwiększenie o cztery razy w porównaniu z C0). Przy mniejszej zawartości dodatku rozdrobnionej gumy w betonie (5 i 10%) maksymalna głębokość penetracji wody pod ciśnieniem wyniosła odpowiednio 39 mm – zwiększenie o 24% w porównaniu C0 i 31 mm – brak zwiększenia w porównaniu z C0. Głębokość wnikania wody do betonu referencyjnego wynosiła 31 mm.

Badanie mrozoodporności betonów z dodatkiem rozdrobnionej gumy oraz referencyjnego wykonano po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania (rysunek 3). Wymaganie normowe w celu oceny spełnienia stopnia mrozoodporności F150 polega na spełnieniu trzech kryteriów jednocześnie wg PN-B-06265:2022-08 [20].

Zastosowanie dodatku rozdrobnionej gumy w betonie, niezależnie od jej ilości, nie wpłynęło negatywnie na jego odporność na oddziaływanie mrozu. W porównaniu z betonem referencyjnym próbki z gumą charakteryzowały się mniejszym spadkiem wytrzymałości na ściskanie po 150 cyklach. W przypadku wszystkich badanych betonów odnotowano zwiększenie masy po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania. W przypadku betonu referencyjnego wynosił on 0,1%, a betonów z dodatkiem rozdrobnionej gumy 0,3 ÷ 0,6% (im więcej rozdrobnionej gumy, tym mniejszy przyrost). Próbki nie wykazywały spękań.

Moduł sprężystości betonu z dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych po 28 dniach dojrzewania jest wyraźnie mniejszy niż betonu referencyjnego (rysunek 4). Badanie wykonano zgodnie z normą PN-EN 12390-13. Nie odnotowano natomiast wyraźnego zmniejszenia modułu sprężystości w grupie betonów modyfikowanych odpadami gumy w ilości 5, 10 i 20%. Stosunek modułu sprężystości do wytrzymałości na ściskanie zwiększał się wraz ze zwiększeniem ilości dodatku w poszczególnych mieszankach. Procentowy spadek modułu sprężystości w porównaniu z próbką referencyjną wyniósł: 38% w przypadku próbki C5; 43% w przypadku próbki C10 oraz 41% – próbki C20. Na rysun-

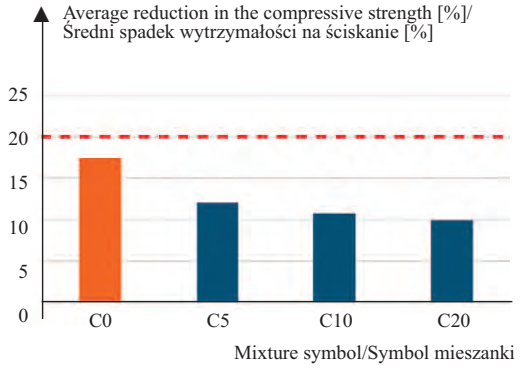


Fig. 3. Average reduction in the compressive strength of concrete without and with the addition of crushed rubber waste after 150 freeze-thaw cycles
Rys. 3. Średnie zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonu bez i z dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania

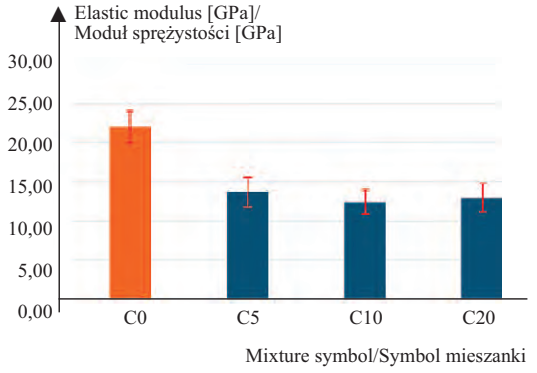


Fig. 4. Modulus of elasticity of concrete without and with the addition of crushed rubber waste
Rys. 4. Moduł sprężystości betonu bez i z dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych

to the reference sample was: 38% for sample C5; 43% for sample C10; and 41% for sample C20. Figure 5 compares the thermal conductivity coefficients of concrete with and without the addition of crushed rubber.

The obtained measurement results of the thermal conductivity coefficient range from 0.61 to 1.04 W/(m K), with the reference concrete characterized by the highest thermal conductivity coefficient. The addition of crushed rubber waste to concrete reduces the thermal conductivity coefficient (the higher the crushed rubber content, the greater the decrease in thermal conductivity). The comparison of the reference concrete with concrete containing 5% of crushed rubber reveals a 15% reduction in thermal conductivity. An even greater difference, 41.4%, is observed between the concrete with the highest crushed rubber content (20%) and the reference concrete. Despite the significant reduction in density of the concretes modified with SBR rubber, their thermal properties was improved. Consequently, it can be concluded that concrete containing crushed rubber (particularly at the highest content) exhibits very good thermal insulation properties, significantly superior to those of cement concrete unmodified with rubber waste.

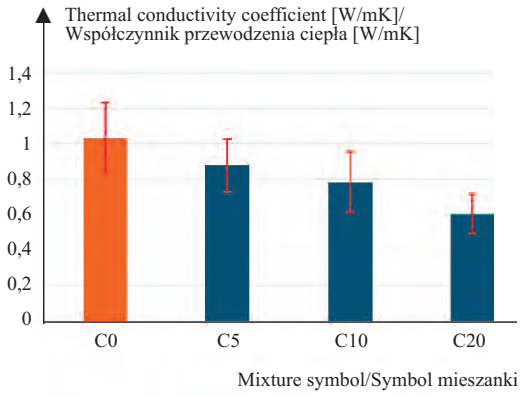


Fig. 5. Average value of the thermal conductivity coefficient of concrete without and with the addition of crushed rubber waste

Rys. 5. Średnia wartość współczynnika przewodzenia ciepła betonu bez i z dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych

ku 5 zestawiono wartości współczynników przewodzenia ciepła betonu bez i z dodatkiem rozdrobnionej gumy.

Uzyskane wyniki pomiarów wartości współczynnika przewodzenia ciepła wynoszą od 0,61 do 1,04 W/(m·K), przy czym beton referencyjny charakteryzuje się największym współczynnikiem przewodzenia ciepła. Dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych do betonu powoduje zmniejszenie współczynnika przewodzenia ciepła (im większa zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych, tym większy spadek wartości współczynnika przewodzenia ciepła). Z porównana betonu referencyjnego z betonem zawierającym 5% rozdrobnionej gumy wynika zmniejszenie wartości współczynnika przewodzenia o 15%. Jeszcze większą różnicę uzyskuje się między betonem z największą ilością rozdrobnionej gumy (20%) a betonem referencyjnym, a mianowicie 41,4%. Pomimo wyraźnego zmniejszenia gęstości betonów modyfikowanych dodatkiem gumy SBR odnotowano poprawę ich właściwości termicznych. Można wnioskować, iż beton z dodatkiem rozdrobnionej gumy (szczególnie z największą jej ilością) ma cechy materiału o bardzo dobrej izolacyjności termicznej, wyraźnie lepszej niż beton cementowy niemodyfikowany odpadami z gumy.

Conclusions

Based on the conducted research and analyses, the following conclusions were drawn:

1) the addition of crushed rubber waste reduces the compressive strength of concrete regardless of its curing time, namely the greater the addition, the greater the strength loss. A simultaneous decrease in the modulus of elasticity of concrete is observed;

2) the addition of rubber improves the frost resistance of concrete, as evidenced by a smaller strength loss compared to the reference concrete. The average decrease in compressive strength of concrete after 150 freeze-thaw cycles is less than the permissible 20% and further decreases with increasing crushed rubber content;

3) modifying concrete with up to 10% of crushed rubber waste does not increase the depth of water penetration; it remains at a similar level to the reference concrete. With a 20% of crushed rubber content, the depth of water penetration under pressure increases dramatically;

4) the addition of crushed rubber reduces the thermal conductivity of concrete, which may be advantageous when requiring very good thermal insulation.

The utilization of rubber waste from recycling of automotive industry by-products and household appliances in concrete can be an effective method of managing these materials.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

1) dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonu niezależnie od czasu jego dojrzewania, przy czym im więcej dodatku, tym większy spadek wytrzymałości. Jednocześnie obserwuje się zmniejszenie modułu sprężystości betonu;

2) dodatek gumy powoduje poprawę odporności na zamrażanie i rozmrażanie betonu, o czym świadczy mniejszy spadek wytrzymałości w porównaniu z betonem referencyjnym. Średni spadek wytrzymałości betonów na ściskanie po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania jest mniejszy niż dopuszczalny 20% i dodatkowo maleje wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionej gumy;

3) modyfikacja betonu odpadami gumowymi w ilości do 10% nie powoduje zwiększenia głębokości penetracji wody; pozostaje ona na zbliżonym poziomie do betonu referencyjnego. Przy 20% udziale rozdrobnionej gumy gwałtowanie zwiększa się penetracja wody pod ciśnieniem;

4) dodatek rozdrobnionej gumy zmniejsza współczynnik przewodzenia ciepła betonu, co może być korzystne w przypadku zastosowania bardzo dobrej izolacyjności termicznej.

Wykorzystanie odpadów gumowych pochodzących z recyklingu odpadów z branży motoryzacyjnej oraz ze sprzętów

Concrete containing up to 10% of crushed rubber can be used for the production of non-structural elements exposed to frost, which additionally exhibit improved thermal insulation properties.

Receivedi: 22.09.2025
Revised: 08.10.2025
Published: 23.12.2025

AGD w betonie może być skutecznym sposobem ich zagospodarowania. Beton z dodatkiem rozdrobnionej gumy do 10% można wykorzystać do produkcji elementów niekonstrukcyjnych narażonych na działanie mrozu, które dodatkowo wykazują poprawę izolacyjności cieplnej.

Artykuł wpłynął do redakcji: 22.09.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 08.10.2025 r.
Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

[1] Korentz J, Szmatuła F. Wpływ dodatku miału gumowego SBR na właściwości zapraw cementowych. Materiały Budowlane. 2020. DOI:10.15199/33.2020.12.02.

[2] Azunna SU, Farah NAA, Aziz, Raizal SM, Rashid, Nabilah BA. Bakar. Review on the characteristic properties of crumb rubber concreto. Cleaner Materials. 2024. DOI: 10.1016/j.clema.2024.100237.

[3] Gruszczyński M, Lenart M, Sokołowski K. Granulat gumowy jako dodatek zapewniający wibroizolacyjność przegród betonowych. Dni Betonu 2023. s. 381-396.

[4] Hisbani N, Shafiq N, Shams MA, Farhan SA, Zahid M. Properties of concrete containing crumb rubber as partial replacement of fine Aggregate – A review. Hybrid Advances. 2025. DOI: 10.1016/j.hybadv.2025.100481.

[5] Liu J, Li J, Xu Y, Ma S. Mechanical Properties of Cement Concrete with Waste Rubber Powder. Appl. Sci. 2024. DOI:10.3390/app14156636.

[6] Major I, Adamczyk I, Halbiniak J. Beton modyfikowany granulatem gumowym SBR i płatkami politereftalanu etylenu PET. Materiały Budowlane. 2023. DOI: 10.15199/33.2023.08.01.

[7] Ołdakowska E. Beton cementowy modyfikowany rozdrobnionymi odpadami gumowymi. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Budownictwo. 2006; z. 109.

[8] Ołdakowska E. Ocena przydatności gumy ze zużytych opon samochodowych do modyfikacji chudych betonów przeznaczonych do podbudów drogowych. Materiały Budowlane. 2014; 4:34 – 36.

[9] Jurczak R, Marczak M. Możliwość wykorzystania poprodukcyjnych odpadów gumowych w mieszankach mineralno-asfaltowych. Drogownictwo. 2023; 2 – 3: 29 – 32.

[10] Kukiełka J. Podbudowy kompozytowe z dodatkiem miału gumowego z recyklingu opon samochodowych do nawierzchni drogowych. Materiały Budowlane 2023. DOI: 10.15199/33.2023.10.08.

[11] Radziszewski P, Sarnowski M, Król J, Kowalski JK, Ruttmar I, Zborowski A. Właściwości asfaltów modyfikowanych gumą i mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych. WKŁ, Warszawa 2017.

[12] PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.

[13] PN-EN 12350-6:2019-08 Badania mieszanki betonowej – Część 6: Gęstość.

[14] PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej – Część 7: Zawartość powietrza – Metody ciśnieniowe.

[15] PN-EN 12390-2:2019-07 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.

[16] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

[17] PN-EN 12390-7:2019-08 Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu.

[18] PN-88/B-06250 Beton zwykły.

[19] PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.

[20] PN-B-06265:2022-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08.