

dr inż., Maria Ratajczak, inż., Jakub Książek, mgr inż., Marta Thomas, dr hab. inż., prof. PP, Agnieszka Śłosarczyk
Politechnika Poznańska

Ocena mrozoodporności zapraw cementowych z dodatkiem kruszywa pochodzącego z recyklingu

Evaluation of Frost Resistance in Cement Mortars Containing Recycled Aggregate

Streszczenie

Konieczność dekarbonizacji branży betonowej oraz wdrażanie idei gospodarki obiegu zamkniętego przejawia się, między innymi, poprzez stosowanie na coraz większą skalę kruszyw recyklingowych, także tych o drobnym uziarnieniu. Równie istotnym aspektem jest zapewnienie odpowiednich parametrów wytrzymałościowych oraz trwałościowych wznoszonych konstrukcji. Wymaga to holistycznego podejścia do zagadnień związanych z projektowaniem i wdrażaniem na rynek nowych materiałów. Trend ten jest wyraźnie widoczny w prowadzonych badaniach naukowych, gdzie charakterystyki środowiskowe stają się równie ważnym czynnikiem w ocenie jakości nowych rozwiązań materiałowych.

Celem przeprowadzonych badań była ocena trwałości oraz analiza oddziaływania środowiskowego recyklingowych zapraw cementowych. W pracy wykorzystano dwa rodzaje kruszywa recyklingowego o frakcji 0 – 2 mm: miał ceramiczny oraz miał betonowy, które podstawiano za piasek normowy w ilościach 20% oraz 40% wagowo. Badania wykazały, że dodatek drobnych kruszyw recyklingowych w nieznacznym stopniu obniża wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania w stosunku do próbki referencyjnej. Badania mrozoodporności wykazały, iż zaprawy recyklingowe charakteryzują się znacznie lepszą odpornością na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w porównaniu do zaprawy na kruszywie naturalnym, dzięki czemu mogą być stosowane w miejscach narażonych na działanie niekorzystnych warunków atmosferycznych. Analiza śladu węglowego wykazała, że zaprawy cementowe z dodatkiem kruszyw recyklingowych mają nieznacznie niższy ślad węglowy w porównaniu do zaprawy normowej, a kluczowym czynnikiem wpływającym na emisyjność zapraw jest rodzaj oraz zawartość cementu, który charakteryzuje się najwyższym współczynnikiem emisji dwutlenku węgla. W związku

z tym, jako dalszy etap badań, zaproponowano ocenę trwałości zapraw recyklingowych na bazie spoiw o obniżonym śladzie węglowym.

Abstract

The necessity to decarbonize the concrete industry and implement the principles of a circular economy is increasingly reflected in the use of recycled aggregates, including those with fine particle sizes. Equally important is ensuring appropriate strength and durability parameters in constructed structures. This requires a holistic approach to the design and market implementation of new materials. This trend is clearly evident in current scientific research, where environmental characteristics are becoming as important as mechanical properties in evaluating the quality of novel material solutions.

The aim of this study was to assess the durability and analyze the environmental impact of recycled cement mortars. Two types of fine recycled aggregates (0–2 mm fraction) were used: crushed ceramic waste and crushed concrete waste, which were substituted for standard sand in amounts of 20% and 40% by weight. The tests showed that the addition of fine recycled aggregates slightly reduces the 28-day compressive strength compared to the reference sample. Freeze–thaw resistance tests revealed that recycled mortars exhibit significantly better resistance to cyclic freezing and thawing compared to mortars made with natural aggregate, indicating their suitability for use in environments exposed to harsh weather conditions.

Carbon footprint analysis demonstrated that cement mortars containing recycled aggregates have a slightly lower carbon footprint compared to conventional mortars. The key factor affecting mortar emissions was found to be the type and content of cement, which has the highest carbon dioxide emission factor. As a next stage of the research, it is proposed to evaluate the durability of recycled mortars based on binders with a reduced carbon footprint.

1. Zaprawy cementowe na bazie kruszyw recyklingowych

Współczesne budownictwo zmaga się z licznymi wyzwaniami wynikającymi z ogólnościowych trendów dotyczących ochrony środowiska, idei zrównoważonego rozwoju oraz zmian w przepisach prawnych i wymaganiach technologicznych. W dobie intensywnego wykorzystywania zasobów naturalnych i konieczności ograniczania emisji gazów cieplarnianych, coraz większego znaczenia nabierają alternatywne rozwiązania materiałowe, w tym wykorzystanie surowców wtórnych pozyskanych z recyklingu. Szczególne miejsce w tych rozważaniach zajmuje produkcja zapraw cementowych, powszechnie używanych w branży budowlanej – zarówno przy wznoszeniu nowych konstrukcji, jak i przy pracach remontowych. Tradycyjne zaprawy cementowe opierają się głównie na kruszywach naturalnych, co prowadzi do nadmiernego zużycia zasobów oraz generowania wysokiej emisji dwutlenku węgla. W związku z tym niezbędne jest wdrażanie bardziej ekologicznych i zrównoważonych rozwiązań, które zmniejszą negatywne oddziaływanie sektora budowlanego na środowisko naturalne, jednocześnie zachowując wymagane właściwości techniczne i trwałość materiałów.

1.1 Kruszywa z recyklingu w ujęciu norm europejskich

Obecnie norma PN-EN 12620+A1 Kruszywa do betonu [1] rozróżnia następujące składniki kruszywa z recyklingu:

- Rc – gruz betonowy,
- Ru – niezwiązany kamień, kamień naturalny, kruszywo niezwiązane hydraulicznie,
- Rb – gruz z elementów murowych,
- Ra – materiały bitumiczne,
- Rg – szkło,
- FL – materiał pływający po wodzie
- X- inne składniki.

Ponadto norma PN-EN 206+A2 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność [2] wprowadza zalecenia dotyczące maksymalnej procentowej wartości zastąpienia kruszyw grubych w zależności od rodzaju kruszywa z recyklingu oraz klasy ekspozycji. Stosowanie kruszyw recyklingowych jest zalecane jedynie przy klasach ekspozycji: X0 (do 50%), XC1, XC2 (do 30% lub 20% w zależności od składu kruszywa recyklingowego), XC3, XC4, XF1, XA1, XD1 (do 30%). W przypadku pozostałych, bardziej wymagających, klas ekspozycji stosowanie kruszyw recyklingowych w betonach nie jest zalecane. Należy tutaj podkreślić, że rekomendacje te dotyczą jedynie zaazotowanie kruszywa grubego.

W odniesieniu do drobnych frakcji materiałów odpadowych, powstających podczas prac rozbiórkowych oraz w efekcie procesów kruszenia, normy dopuszczają stosowanie pyłu z recyklingu betonowego (F) jako dodatek do cementu [3], wprowadzając przy tym sześć nowych rodzajów cementów powszechnego użytku: cementy portlandzkie recyklingowe CEM II/A-F i CEM II/B-F, cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A-M, CEM II/B-M i CEM II/C-M oraz cement wieloskładnikowy CEM VI. Zastosowanie wtórnego kruszywa drobnego jako alternatywy dla kruszywa naturalnego w kompozytach cementowych wciąż napotyka na bariery prawne, które ograniczają możliwości pełnego zagospodarowania odpadów budowlanych. Brak odpowiednich regulacji utrudnia wdrożenie tego rozwiązania na szerszą skalę, co hamuje postęp w kierunku realizacji założeń gospodarki o obiegu zamkniętym.

1.2 Kompozyty cementowe na bazie kruszyw recyklingowych

Badania nad zastosowanie kruszyw recyklingowych w materiałach cementowych trwają od wielu lat i prowadzone są przez wiele ośrodków badawczych. Począwszy od badań skupiających się na właściwościach samego kruszywa recyklingowego [4], poprzez wydajność i efektywność sposobów ich otrzymywania [5, 6]. W badaniach laboratoryjnych jako surowiec kruszyw wtórnych wykorzystuje się głównie destrukty betonowy [7, 8] i ceramiczny, np. z płytek ceramiczne [5], armatury sanitarnej [9], ceramicznych izolatorów elektrycznych [10], czy elementów murowych [11, 12, 13], choć wśród surowców kruszyw recyklingowych można również znaleźć alternatywne źródła, takie jak np. elektrośmieci [14]. Głównym polem zainteresowań badaczy jest wykorzystanie kruszyw recyklingowych jako zamiennik naturalnego kruszywa grubego [9, 13], a badania laboratoryjne wykazują, że optymalny dodatek kruszywa recyklingowego kształtuje się na poziomie 20% [8]. Prowadzone prace badawcze

prezentują potencjał wykorzystania drobnych frakcji kruszyw recyklingowych jako zamiennik kruszywa drobnego lub jako dodatek do spoiwa cementowego [15, 16]. Większość dotychczasowych prac prezentuje wyniki badań laboratoryjnych skupiających się na cechach mechanicznych i trwałościowych projektowanych rozwiązań materiałowych, nie uwzględniając aspektów środowiskowych. Zaproponowany w artykule plan badań, analizujący wpływ recyklingowych kruszyw drobnych na parametry wytrzymałościowe i trwałość kompozytów cementowych, w połączeniu z oceną środowiskową są odpowiedzią na potrzebę naukowego uzasadnienia i standaryzacji stosowania drobnokruszywowych materiałów z recyklingu w budownictwie. Tego rodzaju podejście może przyczynić się do opracowania wytycznych technicznych i prawnych, które zwiększą zaufanie branży do alternatywnych surowców, a tym samym ułatwią ich szersze wdrażanie w praktyce inżynierskiej.

2. Materiały i plan badań

W artykule przedstawiono wyniki badań mechanicznych oraz trwałościowych wraz z analizą środowiskową zapraw cementowych wykonanych na bazie kruszyw naturalnych oraz recyklingowych. Próbkę badawczą stanowiły normowe beleczki o wymiarach 40x40x160 mm, wykonane zgodnie z normą PN-EN 196-1 Metody badania cementu – Część 1. Oznaczanie wytrzymałości [17].

2.1 Materiały

Zaprawy cementowe, zarówno próbki referencyjne, jak i próbki z kruszywem recyklingowym, wykonano na bazie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, piasku normowego oraz wody destylowanej. Jako kruszywo recyklingowe wykorzystano dwa rodzaje destruktyw: ceramiczny oraz betonowy.

Miał ceramiczny o frakcji 0 – 2 mm pozyskano w wyniku przekruszenia przesiewania materiałów ceramicznych, składających się z fragmentów cegieł, dachówek oraz ewentualnych resztek elementów drewnianych. Surowce te pochodziły ze składowiska odpadów budowlanych, gdzie były wystawione przez nieokreślony okres czasu na działanie niekorzystnych warunków atmosferycznych. Miał betonowy o frakcji 0 – 2 mm został pozyskany w wyniku przekruszenia i przesiewania zdemontowanych peronowych płyt betonowych. peronowych. W tabeli 1 zestawiono receptury badanych próbek laboratoryjnych wraz z ich akronimami stosowanymi w dalszej części artykułu.

Tab. 1. Receptury zapraw cementowych.

Lp.	Akronim	Składniki zapraw cementowych				
		Cement [g]	Piasek normowy [g]	Miał ceramiczny [g]	Miał betonowy [g]	Woda destylowana [g]
1	REF	450	1350	0	0	225
2	20_CERAM	450	1080	270	0	225
3	40_CERAM	450	810	540	0	225
4	20_BET	450	1080	0	270	225
5	40_BET	450	810	0	540	225

2.2 Badania laboratoryjne

W ramach badań laboratoryjnych wykonano podstawowe badania właściwości geometrycznych oraz fizycznych kruszyw: oznaczono skład ziarnowy kruszyw metodą przesiewania, zgodnie z normą PN-EN 933-1 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1. Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania [18] oraz oznaczono gęstość nasypową kruszyw w stanie luźnym oraz zagęszczonym, zgodnie z normą PN-EN 1097-3: Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 3: Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości [19].

Dla wykonanych zapraw cementowych oznaczono wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, zgodnie z normą PN-EN 196-1 [17]. Następnie przeprowadzono badania trwałościowe, polegające na ocenie stopnia mrozoodporności recyklingowych zapraw cementowych. Badanie przeprowadzono zgodnie z załącznikiem N normy PN-B-06265 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08 [20]. Próbkę laboratoryjną badano po 25, 50, 75, 100, 125 oraz 150 cyklach zamrażania i rozmrażania, a do oceny mrozoodporności zastosowano dwa kryteria:

- łączna masa ubytków materiału w postaci zniszczonych narożników i krawędzi, odprysków kruszywa itp.,
- obniżenie wytrzymałości na ściskanie, w stosunku do wytrzymałości próbek niezamrażanych.

Ostatnim etapem prac laboratoryjnych była ocena środowiskowa analizowanych receptur zapraw recyklingowych. W tym celu obliczono wartości potencjału tworzenia efektu cieplarnianego (ang. GWP – Global Warming Potential) zgodnie z wytycznymi z normy PN-EN 15804+A2 Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych [21]. Analiza została przeprowadzana w oparciu o metodologię oceny cyklu życia (ang. LCA – Life Cycle Assessment), koncentrując się na etapach A1-A3, obejmujących procesy związane z pozyskiwaniem surowców, ich transportem oraz produkcją materiału. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem oprogramowania OneClick LCA (One Click LCA© Version: 0.30.0, Database version: 7.), zaś w tabeli 2 zestawiono wartości GWP dla poszczególnych materiałów. W przypadku kruszyw recyklingowych na wartość GWP składa się ślad węglowy pochodzący od nakładów energetycznych kruszarek budowlanych (przyjęto założenie, że gruz jest przekruszony bezpośrednio na placu budowy i po przekruszeniu ponownie wykorzystany jako składnik zapraw).

Tab. 2. Wartości GWP materiałów wykorzystanych do zapraw.

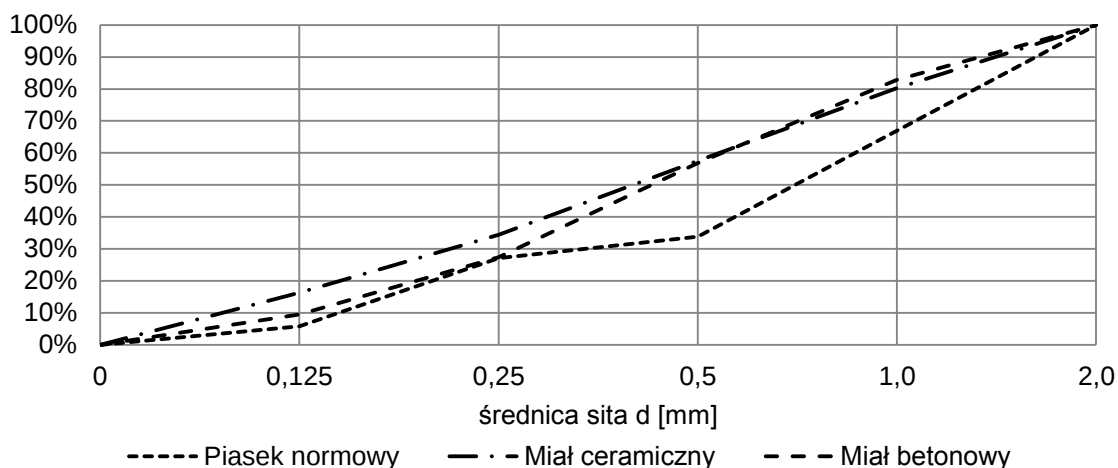
Lp.	Materiał	GWP (A1-A3) eqkgCO ₂ /kg	Źródło
1	Cement CEM I 42,5 R	0,6640	[22]
2	Woda destylowana	0,00030	[23]
3	Piasek normowy	0,00232	[23]
4	Miało ceramiczne	0,001675	opracowanie własne
5	Miało betonowe	0,001675	opracowanie własne

3. Wyniki badań wraz z analizą

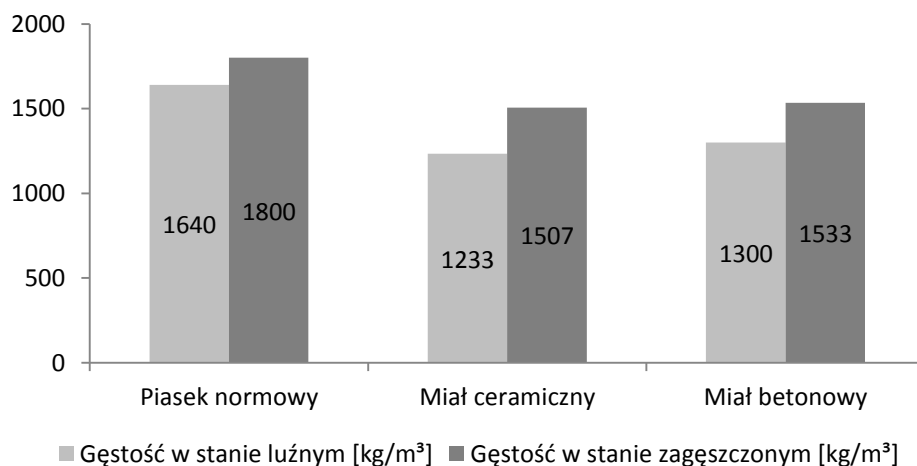
3.1 Właściwości geometryczne oraz fizyczne kruszyw

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki oznaczania składu ziarnowego analizowanych kruszyw: piasku normowego oraz kruszyw recyklingowych (miału ceramicznego oraz miału betonowego). Na rysunku 3 przedstawiono wyniki oznaczania gęstości nasypowej w stanie luźnym oraz w stanie zagęszczonym.

Rys. 1. Skład ziarnowy kruszyw.



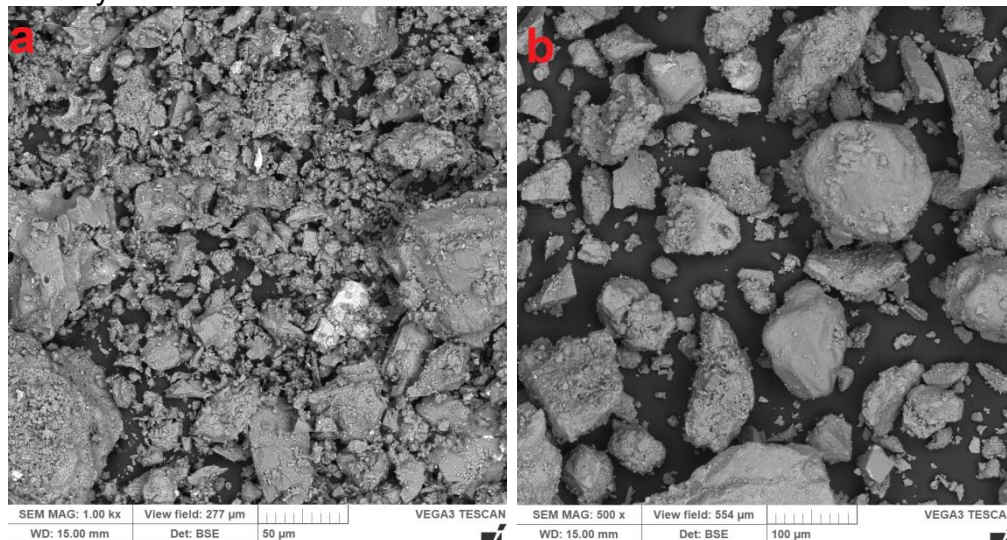
Rys. 2. Gęstości nasypowe kruszyw.



Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wszystkie analizowane kruszywa, zgodnie z normą PN-EN 12620 Kruszywa do betonu, należy zaklasyfikować do kategorii Gf₈₅, jednak warto zauważyć, że kruszywa recyklingowe charakteryzują się większym udziałem frakcji drobnych, zwłaszcza w przedziale 0,25 – 0,5 mm. Ponadto miału ceramiczny cechuje się drobniejszym uziarnieniem niż miał betonowy, co zostało potwierdzone obrazowaniem mikroskopowym SEM (Rys. 3). Badanie oznaczanie gęstości nasypowych wykazało, że oba kruszywa recyklingowe mają niższe wartości gęstości nasypowych, zarówno w stanie luźnym, jak i zagęszczonym, w porównaniu do piasku normowego. Ponadto wartość gęstości

nasypowej miálu ceramicznego w stanie luźnym jest na pograniczu wartości dla kruszyw lekkich ($< 1200 \text{ kg/m}^3$).

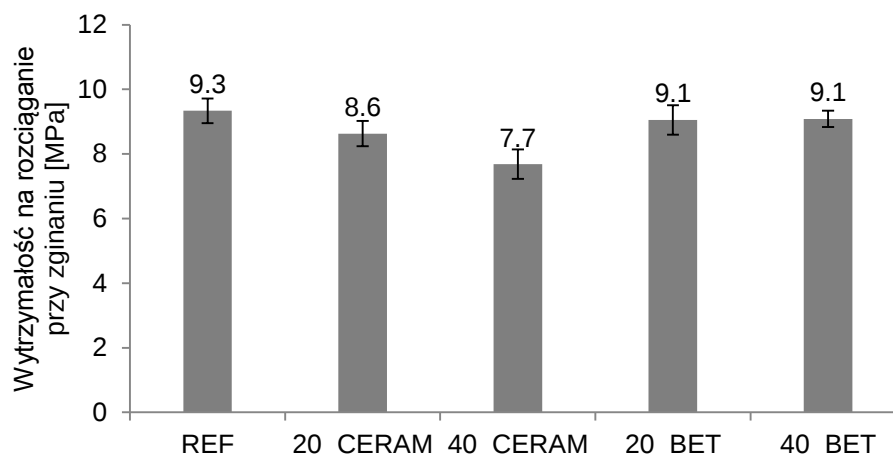
Rys. 3. Obrazy mikroskopowe SEM kruszyw recyklingowych: (a) miál ceramiczny, (b) miál betonowy.



3.2 Właściwości mechaniczne i trwałościowe recyklingowych zapraw cementowych

Na rysunku 4 i 5 przedstawiono wyniki oznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości na ściskanie próbek zapraw cementowych po 28 dniach dojrzewania.

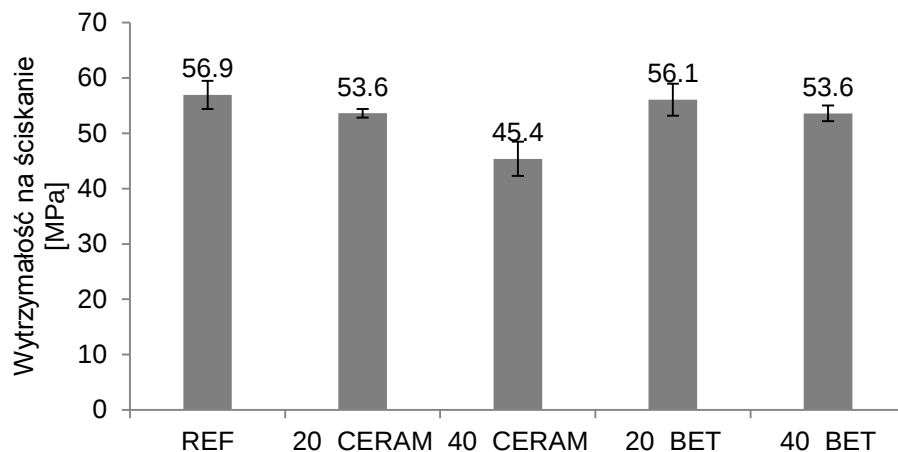
Rys. 4. Wyniki oznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach dojrzewania.



Badania oznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania wykazały, że dodatek kruszywa recyklingowego w postaci miálu ceramicznego powoduje nieznaczny spadek obu wartości parametrów mechanicznych i jest on zależny od ilości użytego kruszywa recyklingowego. Przy 40% podstawieniu zaobserwowano ok. 17% spadek wartości

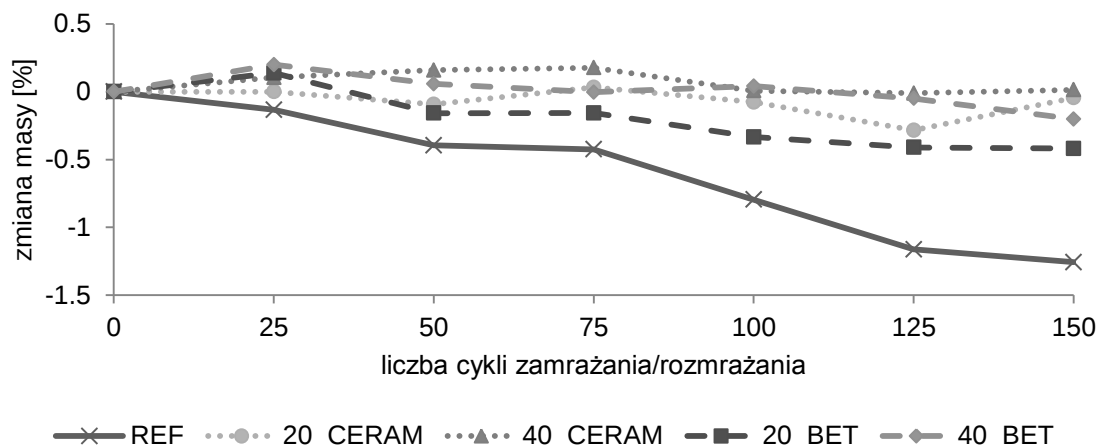
wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz ok. 20% spadek wartości wytrzymałości na ściskanie. W przypadku zastąpienia kruszywa naturalnego miałem betonowym w ilości 20% oraz 40% zaobserwowane zmiany wartości parametrów wytrzymałościowych nie są statystycznie istotne.

Rys. 5. Wyniki oznaczania wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.



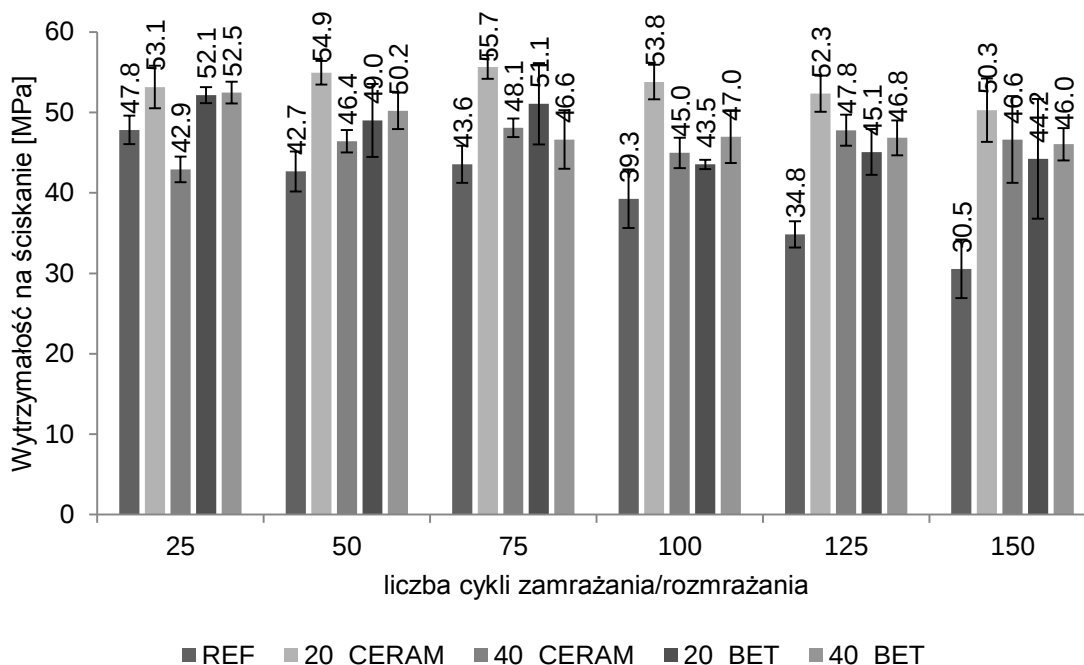
Na rysunku 6 przedstawiono wyniki oznaczania ubytków masy po kolejnych cyklach zamrażania – rozmrażania. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że wszystkie badane próbki spełniają normowe kryterium dotyczące maksymalnego dopuszczalnego ubytku masy na poziomie 5%. We wszystkich analizowanych zaprawach zaobserwowano stopniowy wzrost wartości ubytków masy w miarę postępujących cykli zamrażania i rozmrażania. Największy ubytek masy w każdym etapie badania odnotowano w próbkach referencyjnych, które po 150 cyklach osiągnęły wartość 1,26%. Dla zapraw cementowych zawierających kruszywa recyklingowe zaobserwowano dużo niższe wartości ubytku masy, a najwyższą wartość, na poziomie 0,42% po 150 cyklach zamrażania – rozmrażania, osiągnęły próbki z 20% zawartością miału betonowego. Najniższe wartości ubytku masy odnotowano dla próbek z 40% zawartością miału ceramicznego.

Rys. 6. Ubytki masy po kolejnych cyklach zamrażania – rozmrażania.



Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie zapraw cementowych po kolejnych cyklach zamrażania i rozmrażania. Wszystkie analizowane próbki wykazują stopniowy spadek wytrzymałości w miarę zwiększającej się liczby cykli. Już po 50 cyklu zaobserwowano wyraźne różnice pomiędzy próbkami referencyjnymi a tymi zawierającymi kruszywo recyklingowe – na korzyść tych drugich. W przypadku próbek z dodatkiem miazu ceramicznego stwierdzono istotne statystycznie różnice w wytrzymałości na ściskanie w zależności od zastosowanej ilości kruszywa, przy czym wyższe wartości uzyskano dla zapraw zawierających 20% tego dodatku. Z kolei dla próbek z miazem betonowym nie odnotowano istotnych statystycznie różnic w wytrzymałości niezależnie od zawartości kruszywa recyklingowego, na żadnym etapie badania mrozoodporności.

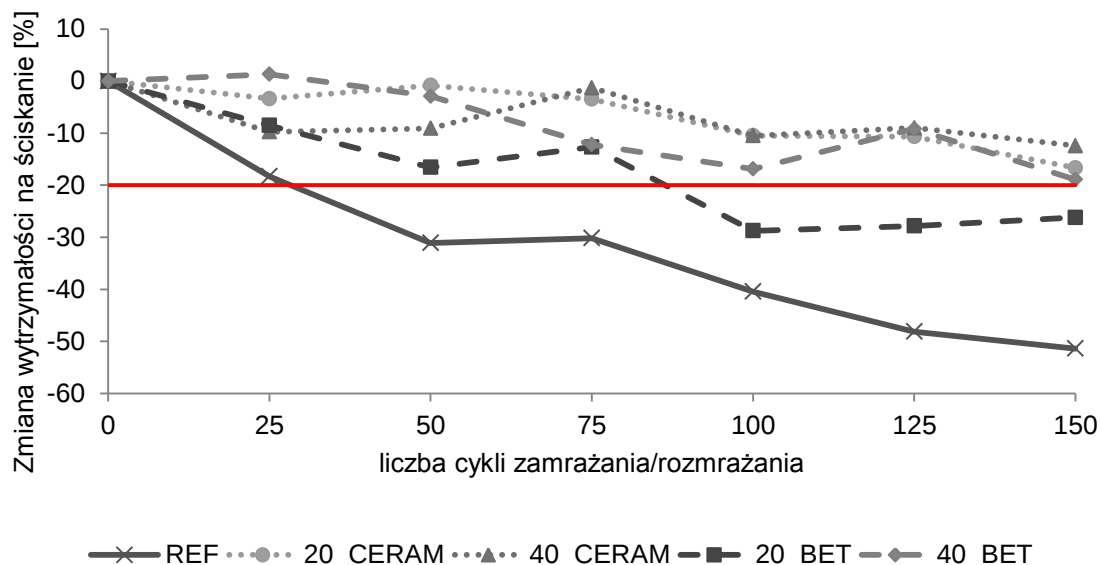
Rys. 7 Wyniki oznaczania wytrzymałości na ściskanie po kolejnych cyklach zamrażania – rozmrażania.



Na rysunku 8 przedstawiono procentowy spadek wytrzymałości na ściskanie zapraw cementowych po kolejnych cyklach zamrażania i rozmrażania. Próbki referencyjne już po 25 cyklu nie spełniały normowego kryterium maksymalnego dopuszczalnego spadku wytrzymałości na poziomie 20%, co świadczy o ich ograniczonej odporności na działanie mrozu. W przypadku zapraw z dodatkiem kruszywa recyklingowego jedynie próbki zawierające 20% miazu betonowego po 100 cyklach przekroczyły próg 20% spadku wytrzymałości. Pozostałe próbki wykazały większą odporność, osiągając stopień mrozoodporności F150. Najmniejszy spadek wytrzymałości na ściskanie odnotowano dla zapraw zawierających 40% miazu ceramicznego, co wskazuje na szczególnie korzystny wpływ tego rodzaju kruszywa na odporność na cykliczne działanie mrozu. Analiza zarówno ubytków masy, jak i spadków wytrzymałości potwierdza, że dodatek kruszywa recyklingowego poprawia odporność zapraw cementowych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Lepsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu miazu ceramicznego, dla którego zarejestrowano niższe

ubytki masy oraz mniejsze obniżenie wytrzymałości w porównaniu z zaprawami zawierającymi miąż betonowy. Mrozoodporność badanych zapraw była również zależna od ilości zastosowanego kruszywa. Zarówno w przypadku miąż ceramicznego, jak i betonowego, lepsze rezultaty uzyskano przy zawartości 40% w porównaniu do 20%.

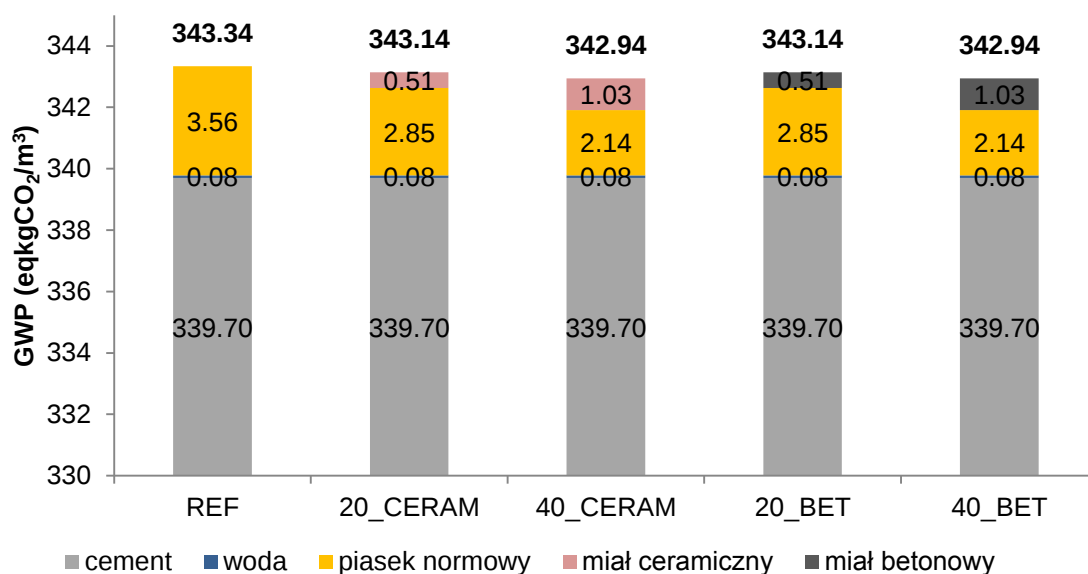
Rys. 8 Spadki wytrzymałości na ściskanie po kolejnych cyklach zamrażania – rozmrażania.



3.3 Analiza środowiskowa recyklingowych zapraw cementowych

Na rysunku 9 przedstawiono wartości GWP (A1-A3) dla zaprawy referencyjnej oraz zapraw wykonanych na bazie kruszyw recyklingowych.

Rys. 9. Wartości GWP (A1-A3) badanych zapraw.



Na podstawie uzyskanych wyników analiz stwierdzono, że podstawienie kruszywa recyklingowego za kruszywo naturalne w nieznacznym stopniu obniża wartość śladu węglowego zapraw cementowych. Wynika to przede wszystkim z relatywnie niskiej wartości śladu węglowego kruszyw naturalnych w stosunku do wartości śladu węglowego spoiwa cementowego. We wszystkich przeanalizowanych wariantach cement odpowiada za ponad 99% skumulowanej wartości wskaźnika GWP, co jednoznacznie wskazuje, że kluczowy potencjał redukcji oddziaływania środowiskowego zapraw cementowych związany jest z zastosowaniem niskoemisyjnych spoiw alternatywnych.

Przeprowadzone analizy środowiskowe nie obejmują jednak dwóch istotnych czynników: ograniczonej dostępności zasobów kruszyw naturalnych oraz konieczności zagospodarowania odpadów budowlanych powstających w wyniku prac rozbiórkowych. Czynniki te stanowią kluczowe determinanty intensyfikacji wykorzystania kruszyw pochodzących z recyklingu w przemyśle materiałów cementowych, ukierunkowanej na maksymalizację ich zastosowania w praktyce inżynierskiej.

4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych stwierdzono, że:

- zastosowanie miałów pochodzenia wtórnego w zaprawach cementowych prowadzi do nieznacznego obniżenia ich wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości na ściskanie, przy czym kluczowe znaczenia ma rodzaj i ilość zastosowanego materiału;
- zaprawy recyklingowe charakteryzują się wysoką odpornością na cykliczne działanie zamrażania i rozmrażania, dzięki czemu mogą być stosowane w miejscach narażonych na działanie niekorzystnych warunków atmosferycznych;
- analiza śladu węglowego wykazała, że zaprawy cementowe z dodatkiem kruszyw recyklingowych mają nieznacznie niższy ślad węglowy w porównaniu do zapraw normowych, a kluczowym czynnikiem wpływającym na wartość GWP jest rodzaj i zawartość cementu.

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, iż zaprawy cementowe zawierające komponenty pochodzące z recyklingu mogą stanowić pełnowartościową alternatywę dla konwencjonalnych mieszanek cementowych, oferując zarówno korzyści środowiskowe, jak i użytkowe — w tym poprawę odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Pomimo nieznacznie obniżonych parametrów wytrzymałościowych na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu, materiały te wykazują istotny potencjał w zastosowaniach narażonych na oddziaływanie niekorzystnych warunków atmosferycznych. Z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju, ich wdrażanie znajduje uzasadnienie w ograniczeniu negatywnego wpływu na środowisko. Niemniej jednak należy podkreślić, iż całkowity ślad węglowy zapraw recyklingowych pozostaje w dużej mierze determinowany przez rodzaj i zawartość cementu, który ze względu na wysoki współczynnik emisji dwutlenku węgla istotnie obciąża bilans środowiskowy analizowanych kompozytów.

Badania były współfinansowane przez Unię Europejską w ramach programu Horyzont Europa FP4 — projekt Rail4EARTH „Zrównoważone i ekologiczne systemy kolejowe” (GA 101101917) oraz współfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (dawniej Ministerstwo Edukacji i Nauki) w ramach programu „Projekty Międzynarodowe Współfinansowane” (umowa nr 5400/HE/2023/2) oraz współfinansowane przez Politechnikę Poznańską, numer grantu 0412/SBAD/0080.

5. Literatura

- [1] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu.
- [2] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność.
- [3] PN-EN 197-6:2023-09 Cement – Część 6: Cement z materiałów budowlanych pochodzących z recyklingu.
- [4] P. Ogrodnik, B. Zegardło, D. Pieniak, Badanie twardości jako metoda oceny jakości recyklingowych kruszyw ceramicznych do betonów, Zeszyty Naukowe SGSP 2017, Nr 62 (tom 2)/2/2017.
- [5] T. Gawenda, Z. Naziemiec, A. Walerak, Badania wybranych właściwości kruszyw z odpadów ceramicznych oraz betonu wytworzonego z ich udziałem, Rocznik Ochrona Środowiska, vol. 15, 2013, s. 2003–2013.
- [6] V. Venkrbec, N. Haond, V. Boel, I. Novakova, Towards sustainable construction: RCA under different crushing techniques to determine the utilisation potential index for concrete production, Sustainable Materials and Technologies 45 (2025) e01493, DOI: 10.1016/j.susmat.2025.e01493.
- [7] G. Łój, Możliwości stosowania kruszyw z recyklingu budowlanego do wytwarzania betonów wibroprasowanych, Dni Betonu, 2016, s. 1–8.
- [8] L. Lu, Optimal Replacement Ratio of Recycled Concrete Aggregate Balancing Mechanical Performance with Sustainability: A Review, Buildings 2024, 14, 2204. DOI: 10.3390/buildings14072204.
- [9] N. Gasik-Kowalska, A. Koper, P. Wieszczyńska, P. Lisiecka, P. Syska, „Wpływ recyklingowego kruszywa ceramicznego na cechy wytrzymałościowe betonu wysokowartościowego”, Materiały Budowlane, vol. 2, nr 618, 2024, s. 39–44.
- [10] R. M. Senthamarai, P. Devadas Manoharan, D. Gobinath, Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties, Construction and Building Materials 25 (2011) 2413–2419, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.049.
- [11] J. R. Correia, J. de Brito, A. S. Pereira, Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates, Materials and Structures (2006) 39:169–177, DOI: 10.1617/s11527-005-9014-7
- [12] J. de Brito, A.S. Pereira, J.R. Correia, Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates, Cement & Concrete Composites 27 (2005) 429–433, DOI:10.1016/j.cemconcomp.2004.07.005.
- [13] P. B. Cachim, Mechanical properties of brick aggregate concrete, Con. and Building Materials 23 (2009) 1292–1297, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023.
- [14] J. Ramteke, Kaminee Rathore, J. Damodar Supe, Green concrete incorporating industrial waste and E-waste: a review of compressive strength, CO2 emissions, and replacement levels, Asian Journal of Civil Engineering (2025) 26:1881–1906, DOI: 10.1007/s42107-025-01284-0.

- [15] F. Bektas, K. Wang, H. Ceylan, Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1909–1914, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.006.
- [16] B. Zegardło, T. Drzymała, W. Andrzejuk, D. Tokarski, J. Nitychoruk, B. Jaworska, Ceramiczne odpady budowlane powstające w procesie rewitalizacji miasta – badanie możliwości ich wykorzystania jako substytutu cementu do betonów i zapraw, *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* (2018), 27 (4), 452–462, DOI: 10.22630/PNIKS.2018.27.4.43.
- [17] PN-EN 196-1:2016-07 Metody badania cementu – Część 1. Oznaczanie wytrzymałości.
- [18] PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1. Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania.
- [19] PN-EN 1097-3:2000 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 3: Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości.
- [20] PN-B-06265:2022-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08.
- [21] PN-EN 15804+A2:2020-03 Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych.
- [22] https://www.cemex.pl/documents/46481509/67411456/D236-2023_PL_EPD_CEMEX_CEM-I-42_5.pdf/
- [23] <https://oneclicklcaapp.com/main/>