

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

Wpływ kruszyw recyklingowych i cementów niskoemisyjnych na ślad węglowy i trwałość betonu

Effects of recycled aggregates and low carbon cements on the carbon footprint and durability of concrete

Streszczenie

W odpowiedzi na rosnące wymagania dotyczące redukcji śladu węglowego materiałów budowlanych zaproponowano wykonanie betonów z wykorzystaniem dwóch różnych frakcji kruszywa pochodzącego z recyklingu betonowych płyt peronowych. W mieszankach betonowych kruszywo recyklingowe zastępowało do 30% danej frakcji kruszywa naturalnego.

Dodatkowym czynnikiem ograniczającym emisję dwutlenku węgla było zastosowanie cementów niskoemisyjnych. Mając na uwadze, że materiał ekologiczny to przede wszystkim taki, który cechuje się długą trwałością, przygotowane próbki poddano badaniom wytrzymałościowym oraz trwałościowym – w szczególności analizie odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie oraz badaniu ścieralności.

Ponadto przeprowadzono obliczenia wskaźnika potencjału efektu cieplarnianego (*GWP ang. Global Warming Potential*) dla każdej receptury, porównując je z mieszankami zawierającymi wyłącznie kruszywo naturalne i cement portlandzki. Wyniki badań podkreślają konieczność rozważnego doboru składu betonów i zapraw, uwzględniając nie tylko ich początkowy ślad węglowy, ale również długoterminową trwałość i odporność na czynniki środowiskowe.

Abstract

In response to increasing demands to reduce the carbon footprint of construction materials, it was proposed to make concretes using two different fractions of recycled aggregate from concrete platform slabs. In the concrete mixtures, the recycled aggregate replaced up to 30% of a given fraction of natural aggregate.

An additional factor in reducing carbon dioxide emissions was the use of low-carbon cements. Bearing in mind that an environmentally friendly material is first and foremost

one with a long durability, the prepared samples were subjected to strength and durability tests - in particular, an analysis of resistance to cyclic freezing and thawing and an abrasion test.

In addition, Global Warming Potential (GWP) calculations were carried out for each formulation, comparing them with mixes containing only natural aggregate and Portland cement. The findings underscore the need for careful selection of concrete and mortar formulations, considering not only their initial carbon footprint, but also their long-term durability and environmental resistance.

1. Wstęp

W ostatnich latach obserwujemy dekarbonizację branży budowlanej, która jest skutkiem między innymi Protokołu z Kioto podpisanego w 1997 roku przez członków Organizacji Narodów Zjednoczonych, wciąż jednak przemysł cementowy odpowiedzialny jest za 5% globalnej emisji CO₂[1], a cały sektor budowlany za, aż 40%. Z uwagi na ciągły rozwój sektora budowlanego, spowodowany między innymi wzrostem populacji oraz urbanizacji, konieczne jest szukanie rozwiązań, które nie zahamują rozwoju przy jednoczesnym obniżeniu negatywnego wpływu na środowisko, tak by branża budowlana rozwijała się w sposób zrównoważony. Konieczne jest więc przeciwdziałanie zarówno wykorzystywaniu nieodnawialnych surowców naturalnych, takich jak kruszywa oraz obniżanie energochłonności procesów budowlanych [2,3].

Odpowiedzią na te wyzwania może być między innymi stosowanie kruszywa z recyklingu (RA *ang. Recycled Aggregate*), które pojawiło się na rynku na skutek wzrostu ilości odpadów, szczególnie odpadów budowlanych powstających zarówno podczas wznoszenia nowych obiektów budowlanych, jak i remontów i rozbiórek obiektów istniejących. Wyższa świadomość co do segregacji odpadów na budowie, umożliwia pozyskiwanie możliwie niezanieczyszczonego odpadu, który po przekruszeniu oraz rozdzieleniu na odpowiednie frakcje może z powodzeniem zastąpić kruszywo naturalne w betonie. RA może być pochodzenia betonowego (RCA *ang. Recycled Concrete Aggregate*), ceramicznego, szklanego, plastikowego lub ceglanego. Niniejszy artykuł koncentruje się na właściwościach RCA, którego właściwości są podobne do kruszywa naturalnego (NA *ang. Natural Aggregate*). RCA różni się od NA pozostałością starej zaprawy na ziarnach kruszywa. RCA dzieli się na kruszywo grube z recyklingu (CRA *ang. Coarse Recycled Aggregate*) i kruszywo drobne (FRA *ang. Fine Recycled Aggregate*), które różnią się właściwościami [4]. Ponadto, oprócz naturalnych ziaren kruszywa, RA składa się również z przylegającej zaprawy, która negatywnie wpływa na jego właściwości, powodując, że RA charakteryzuje się wyższą porowatością oraz nasiąkliwością niż NA [5–12]. W związku z tym użycie RA powoduje zmianę właściwości zarówno świeżej mieszanki jak i stwardniałego betonu. Kruszywo RA powoduje przede wszystkim zmniejsza urabialność świeżej mieszanki, w związku z wysoką porowatością, co może powodować konieczność wstępnego namaczania kruszywa lub zwiększanie ilości wody użytej do mieszanki [13,14]. Dodatkowo w większości przypadków wytrzymałość na ściskanie betonu spada wraz ze wzrostem zawartości RA, przy czym właściwości trwałościowe takie jak odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie czy dyfuzja chlorków są porównywalne z właściwościami betonów z NA [15,16].

Bez wątpienia inną strategią obniżającą emisyjność betonu jest zmiana składu spoiwa polegająca na zastąpieniu klinkieru dodatkowymi materiałami cementowymi (SCM

ang. *Supplementary Cementitious Materials*). SCMs są konieczne do uzyskania zrównoważonego oraz trwałego kompozytu cementowego. W związku z czym zaprzestaje się korzystania z cementu portlandzkiego CEM I, który w swoim składzie ma głównie klinkier, a w jego miejsce używa się materiałów takich jak: żużle wielkopiecowe, pył krzemionkowy, naturalne pucolany, łupek palony, wapień, gliny kalcynowane, popioły lotne, niektóre popioły z biomasy, drobne frakcje z recyklingu betonu ceramiki czy szkła. Możliwe jest zastąpienie klinkieru nawet do 60% takimi materiałami jak popiołem lotnym czy kalcynowaną gliną, skutkujące polepszeniem właściwości kompozytu cementowego [17,18]. Jednak wciąż konieczne jest poszukiwanie kolejnych SCMs [19]. W związku z czym pojawiają się badania wykorzystujące jako SCMs przeróżne materiały, w szczególności odpady przemysłowe. Warto jednak pamiętać, że niektóre materiały, takie jak żużel stalowniczy czy żużle metali nieżelaznych potrzebują mechanicznej aktywacji co może zwiększać nakłady energetyczne konieczne do uzyskania SCM, a co nie jest korzystne ze względów emisyjności [20,21].

Należy pamiętać, że materiały powstające na bazie spoiw niskoemisyjnych oraz kruszyw recyklingowych poza zadowalającymi właściwościami fizykomechanicznymi, które pozwalają na zastosowanie ich w miejsce betonów zawierających kruszywa naturalne oraz cement portlandzki, muszą być również odpowiednio trwałe i odporne na działanie warunków atmosferycznych. Trwałość jest kluczowym parametrem wpływającym na okres przydatności materiału. Długi okres przydatności materiału zmniejsza zapotrzebowanie na jego sukcesywne naprawy oraz wymianę, dzięki czemu obniża ogólny GWP związany również z produkcją, transportem oraz wbudowaniem materiałów naprawczych [22,23].

Biorąc pod uwagę powyższe czynniki wpływające na emisyjność kompozytów cementowych, a w szczególności betonów, autorzy zdecydowali się na przeprowadzenie badań dla betonów zawierające różne frakcje kruszywa pochodzącego z recyklingu betonowych płyt peronowych oraz niskoemisyjnych spoiw. Badania prowadzone były z uwzględnieniem trwałości oraz GWP powstałych betonów.

2. Materiały

2.1. Cementy

Do badań wykorzystano 3 rodzaje cementów. Pierwszy, zastosowywany jedynie do próbek referencyjnych zawierających jedynie kruszywo naturalne to cement portlandzki CEM I 42,5 R (Górażdże Cement) składający się w przynajmniej 95% z klinkieru. Drugim cementem użytym do badań był cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-M 32,5 R (V-LL) (Cementownia Odra), który zgodnie z recepturą producenta składa się z między 46, a 94% klinkieru, od 5,5 do 44% krzemionkowego popiołu lotnego oraz między 5,5 a 29% kamienia wapiennego. Trzecim zastosowanym cementem był cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) LH/HSR/NA 32,5 R (Górażdże Cement), składający się z 40 do 64% klinkieru, 18 do 30% żużła wielkopiecowego oraz 18 do 30% pucolan naturalnych oraz popiołu lotnego krzemionkowego. Wszystkie użyte cementy są zgodne z PN-EN 197-1 [N1].

2.2. Kruszywa

Do wykonania betonów użyto kruszyw naturalnych takich jak piasek kwarcowy o uziarnieniu 0/2 i żwir o uziarnieniu 2/8 oraz 8/16 oraz grubego kruszywa z recyklingu betonowych płyt peronowych frakcji 2/8 oraz 8/16, które zostało otrzymane poprzez kruszenie płyt kruszarką szczękową.

2.3. Woda i superplastyfikator

Zastosowano wodę wodociągową, w której rozprowadzono superplastyfikator SIKA o nazwie handlowej Sikacem Superplast na bazie fosforanu triizobutyli.

2.4. Receptury

Wszystkie receptury wykonanych betonów miały stałą, niezależną od rodzaju, ilość cementu: 320 kg/m³, wody 144 kg/m³, superplastyfikator 1% masy cementu, kruszywo drobne piasek 800 kg/m³. Ilość kruszyw grubych w recepturach referencyjnych to dla kruszywa 2/8 400 kg/m³ oraz dla kruszywa 8/16 to 800 kg/m³. Modyfikacja receptury polegała na zmianie rodzaju cementu oraz zastąpieniu kruszywa grubego kruszywem z recyklingu. W tabeli 1 przedstawiono, ile jakiego kruszywa grubego użyto do wykonania danej receptury.

Tabela.1. Udział rodzaju kruszywa grubego w poszczególnych mieszankach.

Nazwa próbki	2/8 NA [% frakcji 2/8]	8/16 NA [% frakcji 8/16]	2/8 RCA [% frakcji 2/8]	8/16 RCA [% frakcji 8/16]
I	100	100	-	-
II	100	100	-	-
II 30% F	70	100	30	-
II 30% C	100	70	-	30
II 30% F 30% C	70	70	30	30
V	100	100	-	-
V 30% F	70	100	30	-
V 30% C	100	70	-	30
V 30% F 30% C	70	70	30	30

3. Metody

3.1. Badania kruszyw

Dla kruszyw z recyklingu oraz kruszyw naturalnych przeprowadzono badanie składu ziarnowego metodą przesiewania zgodnie z normą PN-EN 933-1 [N2] oraz badanie gęstości nasypowej w stanie luźnym i zagęszczonym zgodnie z PN-EN 1097-3 [N3]. Badania miały na celu sprawdzenie czy właściwości zastosowanych kruszyw z recyklingu są zbliżone do właściwości kruszyw naturalnych użytych do wykonania mieszanek betonowych.

3.2. Nasiąkliwość

Nasiąkliwość betonów oznaczano zgodnie z normą PN-B-06250. W pierwszej kolejności stwardniałe próbki suszono w piecu w temperaturze 105°C do osiągnięcia stałej masy. Następnie próbki ważono z dokładnością do 0,1 g. Następnie obliczano objętość próbek. Po czym próbki umieszczono w pojemniku i stopniowo dodawano wodę. Po 24 godzinach od momentu całkowitego zalania próbek, próbki zostały zważone. Ważenie powtarzano tak długo, aż różnica w wadze w ciągu 24 godzin była mniejsza niż 0,2%. Nasiąkliwość została obliczona jako procentowy wzrost masy próbki w stosunku do masy próbki przed nasyceniem jej wodą.

3.3. Gęstość

Gęstość próbek betonu i zaprawy została obliczona poprzez oznaczenie masy próbek po 28 dniach dojrzewania w wodzie, a następnie zmierzenie ich wymiarów. Na tej podstawie policzono objętość próbek. Gęstość obliczono dzieląc masę próbki przez jej objętość.

3.4. Wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie betonów określono zgodnie z normą PN-EN 12390-3 [N4]. Badanie przeprowadzono na próbkach sześciennych o wymiarach 100x100x100 mm. Betony dojrzewały przez 28 dni w środowisku wodnym. W celu uzyskania wiarygodnych wyników przygotowano po trzy próbki z każdej receptury. Wytrzymałość na ściskanie określono za pomocą prasy hydraulicznej. Każda próbka została najpierw zważona. Próbki były przetwarzane do zniszczenia przy stałej szybkości obciążenia w zakresie $0,6 \pm 0,2$ MPa/s, po przyłożeniu obciążenia początkowego, które nie przekracza około 30% obciążenia niszczącego, obciążenie jest przykładane do próbki bez wstrząsów i zwiększa się w sposób ciągły z wybraną stałą szybkością $\pm 10\%$, dopóki nie można utrzymać większego obciążenia. Maksymalne obciążenie zostało zarejestrowane. Wytrzymałość na ściskanie obliczono dzieląc maksymalne obciążenie przez pole, na który działała siła.

3.5. Mrozoodporność

Badanie odporności zaprawy na działanie mrozu przeprowadzono zgodnie z normą PN-B-06265 [N5]. Po 28 dniach dojrzewania w wodzie z 3 z 6 próbek betonu (o wymiarach $100 \times 100 \times 100$ mm) zważono i umieszczono w komorze klimatycznej. Próbki poddano 150 cyklom zamrażania i rozmrażania. Następnie próbki ponownie zważono i poddano badaniom wytrzymałości na ściskanie. Pozostałe 3 próbki referencyjne betonów również zważono i poddano badaniom wytrzymałościowym.

3.6. Ścieralność

Test ścieralności przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 13892-3 [N6]. Przygotowano próbki betonu o wymiarach $71 \times 71 \times 71$ mm i pozostawiono do

dojrzwiania w wodzie przez 28 dni. Po wysuszeniu do stałej masy w temperaturze $110 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, próbki zostały zważone z dokładnością do 0,1 g i zmierzone z dokładnością do 0,1mm, a następnie poddane badaniu przy użyciu tarczy Bohmego. Dla każdej próbki wykonano 16 cykli ścierania.

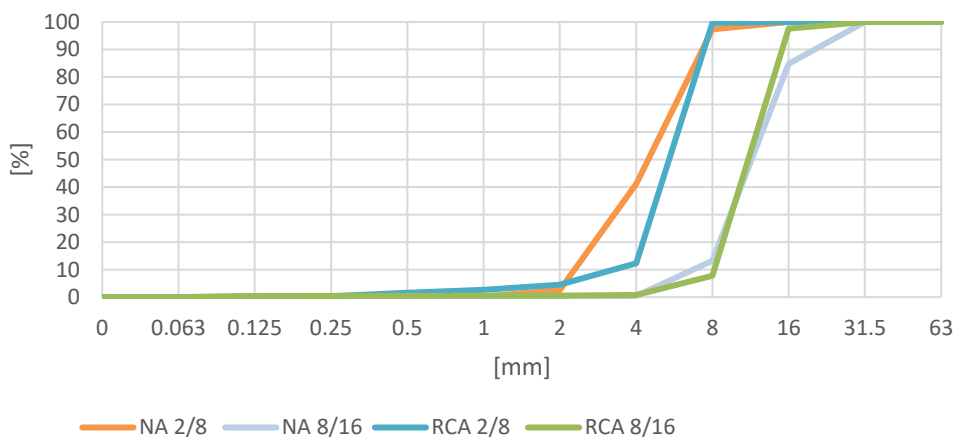
3.7. Global Warming Potential

Przeprowadzono analizę LCA betonów i zapraw pod kątem ich wpływu na środowisko poprzez obliczenie emisyjności każdej receptury. Aby sprawdzić potencjał środowiskowy, zmieniono cement CEM I na cementy CEM II i CEM V oraz zastosowano kruszywa z recyklingu z betonowych płyt peronowych o różnym uziarnieniu zamiast kruszywa naturalnego. Obliczenia oparto wyłącznie na śladzie węglowym poszczególnych surowców, tj. uwzględniono tylko etap produktu ograniczony do modułu A1 zgodnie z normą PN-EN 15804 [N7]. Zdecydowano się pominąć moduły A3 (produkcja) i A2 (transport) ze względu na porównywalność tych wartości we wszystkich mieszankach oraz niewielki wpływ A2 i A3 na potencjał globalnego ocieplenia związany z etapem produkcji od kołyski do bramy. Autorzy zdecydowali się na takie ograniczenie ze względu na fakt, że to właśnie na etapie A1 najtrudniej jest zmniejszyć ilość emitowanego dwutlenku węgla. Dla każdego rodzaju użytego materiału, dane dotyczące potencjału globalnego ocieplenia zostały pobrane z informacji takich jak Deklaracje Środowiskowe Produktu (EPD) i oprogramowanie OneClickLCA.

4. Wyniki

4.1. Badania kruszyw

Wyniki badania składu ziarnowego kruszyw zostały przedstawione na Rys.1. Uziarnienie kruszyw z recyklingu jest zbliżone do kruszywa naturalnego. Zauważyć można jednak, że w przypadku kruszywa 2/8 kruszywo NA zawiera około 40% frakcji 2/4 i około 60% frakcji 4/8 natomiast kruszywo RCA składa się w aż 90% z frakcji 4/8. Frakcja 8/16 obydwu kruszyw ma bardziej zbliżone uziarnienie.



Rys.1. Uziarnienie kruszywa grubego użytego do wykonania betonów.

W tabeli 2 zebrane zostały wyniki badania gęstości nasypowej w stanie luźnym oraz zagęszczonym grubego kruszywa użytego do wykonania betonów. Zauważalna jest niższa gęstość nasypowa kruszywa z recyklingu względem odpowiedniej frakcji kruszywa naturalnego. W przypadku frakcji 2/8 gęstość nasypowa kruszywa z recyklingu w stanie luźnym jest mniejsza o 23% w stanie luźnym oraz o 17% w stanie zagęszczonym niż kruszywa naturalnego. Dla frakcji 8/16 odnotowano 24% i 13% różnicy między gęstością nasypową kruszywa z recyklingu a kruszywa naturalnego odpowiednio w stanie luźnym jak i zagęszczonym.

Tabela.2. Gęstość nasypowa w stanie luźnym i zagęszczonym kruszywa grubego.

Nazwa	Gęstość nasypowa w stanie luźnym [kg/dm ³]	Gęstość nasypowa w stanie zagęszczonym [kg/dm ³]
NA 2/8	1,51	1,68
NA 8/16	1,47	1,55
RCA 2/8	1,17	1,40
RCA 8/16	1,12	1,36

4.2. Właściwości fizyczne betonów

W tabeli 3 zebrano właściwości fizyczne betonów takie jak gęstość oraz nasiąkliwość. Zauważono, że gęstość wszystkich próbek była zbliżona i wynosiła między 2,313 g/cm³, a 2,372 g/cm³. W przypadku nasiąkliwości odnotowana, że betony wykonane z CEM V miały zbliżoną nasiąkliwość do betonu wykonanego przy użyciu CEM I, a wyniki wszystkich receptur były poniżej 5%. Natomiast betony wykonane przy użyciu CEM II cechowała wyższa nasiąkliwość przekraczająca 5%, a najwyższą nasiąkliwość miała receptura wykonana przy użyciu 30% kruszywa RCA o uziarnieniu 2/8.

Tabela.3. Gęstość oraz nasiąkliwość stwardniałego betonu.

Nazwa	Gęstość [g/cm ³]	Nasiąkliwość [%]
I	2,372	4,6
II	2,358	5,2
II 30% F	2,313	5,5
II 30% C	2,360	5,2
II 30% F 30% C	2,324	5,3
V	2,367	4,6
V 30% F	2,334	4,6
V 30% C	2,340	4,8
V 30% F 30% C	2,339	4,9

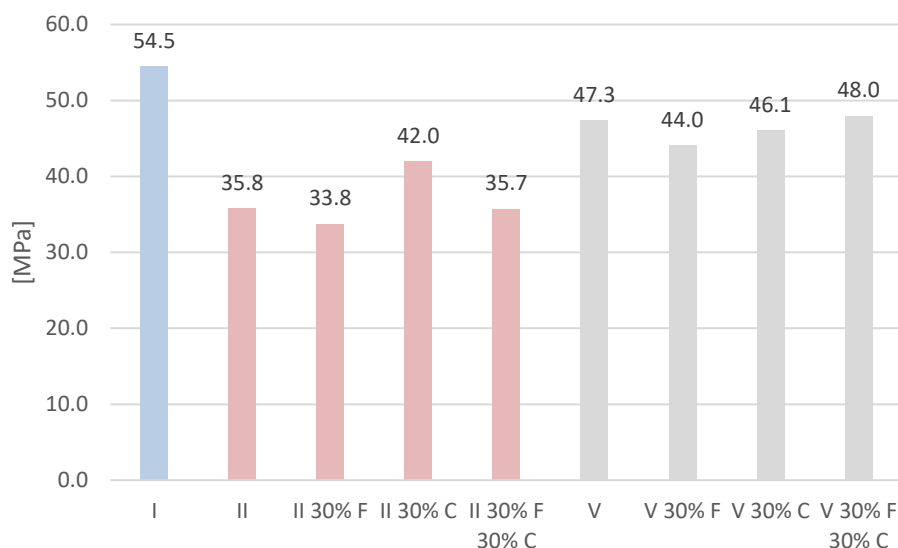
I, II i V – rodzaj użytego cementu

30%F – zastąpienie w 30% kruszywa o frakcji 2/8

30%C – zastąpienie w 30% kruszywa o frakcji 8/16

4.3. Wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie betonów została oznaczona po 28 dniach, a wyniki zostały przedstawione na rysunku 2. Najwyższą wytrzymałość osiągnęła receptura I, ponieważ użyty CEM I był klasy 42,5. Warto jednak zauważyć, że pozostałe receptury, wykonane z CEM II 32,5 i CEM V 32,5, wszystkie osiągnęły ponad 32,5 MPa wytrzymałości. Zauważalne są niższe wytrzymałości w przypadku próbek zawierających CEM II niż CEM V, ale co ciekawe receptura II 30%C, która zawierała 30% kruszywa 8/16 z recyklingu osiągnęła, aż o 17% wyższą wytrzymałość niż referencyjna receptura zawierająca tylko kruszywa naturalne II, co może wskazywać na korzystne działanie kruszywa RCA 8/16 na wytrzymałość przy jednoczesnym zastosowaniu CEM II. Co ważne w przypadku CEM V nie zaobserwowano takiej zależności, a receptura V30%C miała nieznacznie niższą wytrzymałość niż V. W obydwu przypadkach najniekorzystniejsze wyniki uzyskały receptury zawierające 30% RCA o uziarnieniu 2/8, a receptury zawierające 30%F i 30%C RCA miały w obu przypadkach wytrzymałość zbliżoną do referencyjnej receptury wykonanej z tego samego cementu.



Rys.2. Wyniki wytrzymałości na ściskanie.

4.4. Mrozoodporność

Próbki betonowe zostały poddane 150 cyklom zamrażania i rozmrażania. Po badaniu sprawdzono, czy wystąpiły pęknięcia, jaka była procentowa utrata masy po badaniu oraz jaki był procentowy spadek wytrzymałości względem próbek nie poddawanych cyklicznemu zamrażaniu i rozmrażaniu. Na wszystkich próbkach nie zauważono pęknięć. Natomiast uzyskane wyniki utraty masy oraz wytrzymałości przedstawiono w Tabeli 4. Próbki zawierające CEM V charakteryzowała wyższa odporność na działanie mrozu niż próbki z CEM II oraz zbliżona odporność do próbki zawierającej CEM I niezależnie od tego czy użyto kruszywa z recyklingu, jakiej frakcji oraz w jakiej ilości. Wszystkie próbki zawierające CEM V spełniły wymaganie utraty wytrzymałości poniżej 20%, dzięki czemu można uznać je za mrozoodporne. W przypadku próbek z CEM II zauważalna jest poprawa odporności na mróz po dodaniu do receptury kruszywa

z RCA względem próbki referencyjnej II, ale wszystkie receptury (poza recepturą II 30%F) miały spadek wytrzymałości powyżej 20% co klasyfikuje je jako nieodporne na działanie mrozu. Warto jednak zauważyć, że wszystkie referencyjne próbki wykonane z CEM II zawierające kruszywo RCA miały wyższą wytrzymałość niż referencyjne próbki II zawierające jedynie kruszywo naturalne, a szczególnie korzystne było zastosowanie kruszywa 8/16 RCA.

Tabela.4. Wyniki badania mrozoodporności.

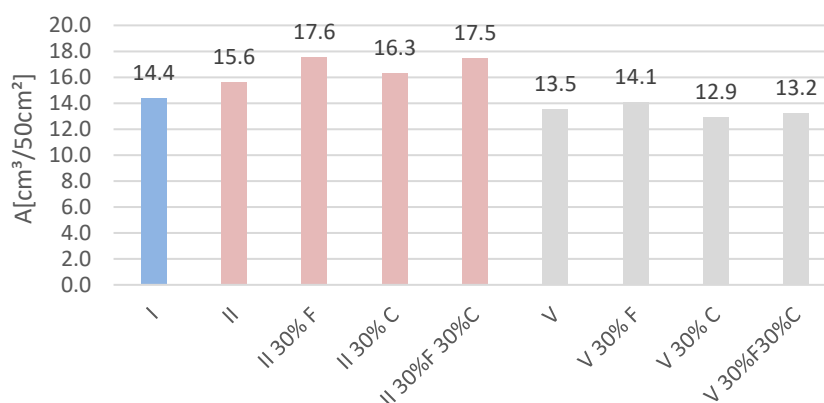
Nazwa	Wytrzymałość próbek testowanych [MPa]	Wytrzymałość próbek referencyjnych [MPa]	Spadek wytrzymałości [%]	Utrata masy [%]
I	44,8	51,3	13	0,09
II	22,4	36,4	39	-0,50
II 30% F	37,8	37,4	0	-0,11
II 30% C	30,7	45,3	32	-0,39
II 30% F 30% C	29,2	40,5	28	0,16
V	43,0	47,0	9	-0,19
V 30% F	42,5	48,8	13	-0,07
V 30% C	45,4	48,9	7	-0,36
V 30% F 30% C	42,7	50,5	15	-0,24

Utratę masy wykazały jedynie próbki I i V, pozostałe próbki charakteryzował nieznaczny przyrost masy. Wszystkie różnice mas były poniżej 0,5 %.

Podsumowując, na odporność badanych betonów na działanie mrozu wpływ miał głównie rodzaj zastosowanego cementu.

4.5. Ścieralność

Wyniki badania odporności na ścieranie przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Sumaryczna utrata objętości po badaniu odporności na ścieranie.

Przeprowadzone badania ścieralności wykazały korzystny wpływ na odporność na ścieranie CEM V oraz nieznaczne polepszenie odporności na ścieranie pod dodaniem kruszywa RCA 8/16. Dodanie kruszywa RCA 2/8 powodowało jedynie nieznaczny spadek odporności względem próbki referencyjnej V oraz delikatny wzrost odporności względem próbki referencyjnej I. Natomiast w przypadku CEM II wszystkie próbki charakteryzowała wyższa utrata objętości niż próbki I oraz wszystkie receptury zawierające CEM V. Dodanie kruszywa RCA 2/8 powodowało zwiększenie utraty objętości tj. obniżenie odporności na ścieranie większe niż dodanie RCA 8/16.

4.6. Global Warming Potential

Przeprowadzona analiza wykazała, iż kluczowym parametrem obniżającym GWP mieszanki betonowej jest rodzaj cementu.

Tabela.5. Sumaryczne GWP dla 1m³ mieszanki betonowej.

	I	II	II30 %F	II30 %C	II30 %F 30% C	V	V30 %F	V30 %C	V30 %F 30% C
GWP [kgCO ₂ eq/m ³]	382	213	213	210	210	327	327	319	319

Najniższe GWP osiągnęły mieszanki zawierające CEM II oraz kruszywo RCA 8/16, natomiast najwyższe receptura zawierająca CEM I oraz kruszywa naturalne. Zastosowanie niskoemisyjnego spoiwa dało obniżenie GWP o 44% przy CEM II oraz 15% przy CEM V. Dodanie kruszywa RCA o uziarnieniu 2/8 nie powodowało różnicy w GWP. Natomiast dodanie kruszywa RCA 8/16 powodowało obniżenie GWP o kolejny 1% dla CEM II oraz o kolejne 1,5% dla CEM V.

5. Wnioski

Przeprowadzane analizy wykazały, iż możliwe jest obniżanie GWP mieszanek betonowych dzięki zastosowaniu CEM II nawet o 45%, jednak może powodować to pogorszenie właściwości betonu, zarówno wytrzymałościowych jak i trwałościowych. Natomiast dzięki zastosowaniu CEM V oraz kruszywa RCA o uziarnieniu 8/16 obniżono GWP o 16,5 % przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wytrzymałości oraz trwałości betonu, co w sposób pozytywny wpływa na długość okresu przydatności materiału. Dzięki czemu materiał nie będzie wymagał napraw, przez co można spodziewać się, że w całym cyklu życia korzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie materiału trwałego o mniej obniżonym GWP związanym z etapem A1 niż materiału o mocno obniżonym GWP związanym z etapem A1, którego okres przydatności jest niższy, a konieczność napraw częstsza. Przeprowadzone badania wykazały, iż kluczowe w projektowaniu materiałów ekologicznych jest kompleksowa analiza zarówno emisyjności materiałów wejściowych jak i ich trwałości.

Badania 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/0091.

Literatura

- [1] Andrew RM. Global CO2 emissions from cement production. *Earth Syst Sci Data* 2018;10:195–217. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>.
- [2] Uddin MdA, Shahabuddin M, Jameel M, Rahman M, Hosen MdA, Alanazi F, et al. Sustainable construction practices in urban areas: innovative materials, technologies, and policies to address environmental challenges. *Energy Build* 2025;341:115831. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115831>.
- [3] Gümüşburun Ayalp G, Metinal YB. Identifying Challenges Affecting Sustainable Construction in the Construction Industry . *Proceedings of International Structural Engineering and Construction* 2024;11. [https://doi.org/10.14455/ISEC.2024.11\(2\).AAE-12](https://doi.org/10.14455/ISEC.2024.11(2).AAE-12).
- [4] Han S, Zhao S, Lu D, Wang D. Performance Improvement of Recycled Concrete Aggregates and Their Potential Applications in Infrastructure: A Review. *Buildings* 2023;13:1411. <https://doi.org/10.3390/buildings13061411>.
- [5] Ali B, Raza SS, Kurda R, Alyousef R. Synergistic effects of fly ash and hooked steel fibers on strength and durability properties of high strength recycled aggregate concrete. *Resour Conserv Recycl* 2021;168. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105444>.
- [6] Silva S, Evangelista L, de Brito J. Durability and shrinkage performance of concrete made with coarse multi-recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater* 2021;272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121645>.
- [7] Ismail S, Kwan WH, Ramli M. Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions. *Constr Build Mater* 2017;155:296–306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.076>.
- [8] Berredjem L, Arabi N, Molez L. Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete. *Constr Build Mater* 2020;246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>.
- [9] Andreu G, Miren E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 2014;52:227–35. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.054>.
- [10] Pedro D, de Brito J, Evangelista L. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. *Constr Build Mater* 2017;154:294–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215>.
- [11] Zhang W, Wang S, Zhao P, Lu L, Cheng X. Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 2019;203:601–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.071>.

- [12] Hao L, Liu Y, Xiao J. Durability of recycled aggregate thermal insulation concrete under combined flexural loading and freeze–thaw cycles. *Constr Build Mater* 2021;272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121652>.
- [13] Poon CS, Kou SC, Lam L. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Mater Struct* 2007;40:981–8. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9192-y>.
- [14] Qasrawi H, Marie I. Towards Better Understanding of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering* 2013;2013:1–8. <https://doi.org/10.1155/2013/636034>.
- [15] Vo D-H, Yehualaw MD, Hwang C-L, Liao M-C, Tran Thi K-D, Chao Y-F. Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete produced from recycled and natural aggregate blended based on the Densified Mixture Design Algorithm method. *Journal of Building Engineering* 2021;35:102067. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102067>.
- [16] Zhu P, Hao Y, Liu H, Wei D, Liu S, Gu L. Durability evaluation of three generations of 100% repeatedly recycled coarse aggregate concrete. *Constr Build Mater* 2019;210:442–50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.203>.
- [17] Hannesson G, Kuder K, Shogren R, Lehman D. The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete. *Constr Build Mater* 2012;30:161–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.046>.
- [18] Arbab F, Tarighat A, Shayanfar MA. Evaluation of electrical resistivity, hydration, and durability against sulfate attack of limestone calcined clay cement (LC3) with various kaolinite content at high-replacement levels. *Constr Build Mater* 2025;469. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140505>.
- [19] Snellings R, Suraneni P, Skibsted J. Future and emerging supplementary cementitious materials. *Cem Concr Res* 2023;171:107199. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107199>.
- [20] Sun X, Liu J, Zhao Y, Zhao J, Li Z, Sun Y, et al. Mechanical activation of steel slag to prepare supplementary cementitious materials: A comparative research based on the particle size distribution, hydration, toxicity assessment and carbon dioxide emission. *Journal of Building Engineering* 2022;60:105200. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105200>.
- [21] Hallet V, De Belie N, Pontikes Y. The impact of slag fineness on the reactivity of blended cements with high-volume non-ferrous metallurgy slag. *Constr Build Mater* 2020;257:119400. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119400>.
- [22] Pajek L, Potočnik J, Božiček D, Košir M. The Role of Energy Efficiency Design Decisions in the Embodied Carbon of Detached Houses, 2025, p. 417–22. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8309-0_56.
- [23] Čáchová M, Kořátková J, Vejmelková E, Černý R. Monitoring the effect of external conditions on the properties of building materials. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2018;365:032051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032051>.

Normy

- [N1] PN-EN 197-1:2012 Cement -- Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku

- [N2] PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania
- [N3] PN-EN 1097-3: 2000 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw -
- Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości
- [N4] PN-EN 12390-3: 2019 Badania betonu -- Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [N5] PN-B-06265:2022-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność -- Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08
- [N6] PN-EN 13892-3: 2015-02 Metody badania materiałów na podkłady podłogowe --
Część 3: Oznaczanie odporności na ścieranie według Bohmego
- [N7] PN-EN 15804:2012 Zrównoważoność obiektów budowlanych -- Deklaracje środowiskowe wyrobów -- Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych