

XIII
KONFERENCJA

2025 DNI BETONU

TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

13-15 października 2025

MONOGRAFIE TECHNOLOGII BETONU - REFERATY



dnibetonu.com

Redakcja: **Jan Deja**
Bartosz Głowacz
Paulina Gos-Błaszczyk
Patryk Jóźwiak
Dariusz Konieczny
Grzegorz Krechowiecki
Zbigniew Pilch
Bożena Środa
Zespół SPC

Skład i łamanie tekstu,
opracowanie graficzne: **AD-LINE.PL**

Projekt: **Artur Darłak**

© Copyright by Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2025

ISBN: 978-83-61331-51-3

Wydawca:  **Stowarzyszenie Producentów Cementu**
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków
tel. +48 12 423-33-55
e-mail: wydawnictwo@polskicement.pl
www.polskicement.pl

XIII
KONFERENCJA

2025.

DNI BETONU

T R A D Y C J A I N O W O C Z E S N O Ś Ć

13-15 października 2025

**MONOGRAFIE
TECHNOLOGII
BETONU**

- REFERATY



dnibetonu.com

CEMENT A TRWAŁOŚĆ KONSTRUKCJI BETONOWYCH

CEMENT AND DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURE

mgr inż. Piotr Molenda, Cement Ożarów S.A.
dr inż. Anna Skawińska, Cement Ożarów S.A.

Wpływ rodzaju oraz ilości spoiwa i wskaźnika W/C na karbonatyzację

EN: The influence of the type and amount of binder and the W/C ratio on carbonation process.

Streszczenie

Beton jest powszechnie wykorzystywanym materiałem w budownictwie, który, powinien zapewnić trwałość konstrukcji utrzymując swoje właściwości użytkowe przez jak najdłuższy okres eksploatacji. W ostatnim czasie przez dynamiczne zmiany zachodzące na rynku materiałów budowlanych wzrosło zastosowanie cementów o obniżonej emisyjności w betonie. Projektując skład mieszanki betonowej należy uwzględnić wpływ wykorzystanego rodzaju cementu oraz dodatku typu II na właściwości mechaniczne i trwałościowe betonu oraz konstrukcji betonowych.

Przedmiotem referatu była ocena wpływu rodzaju spoiwa oraz wskaźnika W/C na przebieg procesu karbonatyzacji oraz wytrzymałości na ściskanie betonu. Proces karbonatyzacji przeprowadzono zgodnie z normą EN 12390-12:2020. W projekcie wykorzystano cementy Cement Ożarów S.A. z następującymi nieklinkierowymi składnikami głównymi: granulowanym żużlem wielkopiecowym (S) oraz popiołem lotnym krzemionkowym (V). Cementy były zgodne z wymaganiami normy PN-EN 197-1. Przedmiotem badań był beton zaprojektowany w oparciu o klasy ekspozycji XC2 oraz XC4. Zaprojektowane mieszanki betonowe bazowały na recepturach wykonanych na cemencie oraz z dodatkiem typu II. Jako referencję zastosowano zalecane graniczne wartości cementu CEM II/A przy stosowaniu dodatku mineralnego zgodnego z normą PN-EN 450-1. Wykonano analizę właściwości użytkowych cementów CEM II/B lub CEM III/A w porównaniu do rozwiązania referencyjnego.

Betonowe mieszanki referencyjne, dla zamierzonego zastosowania, spełniają wymagania normowe (PN-B-06265:2022-08 tabela F.1) w stosunku do zalecanych wartości granicznych dotyczących składu oraz właściwości betonu. Cementy użyte w mieszankach referencyjnych są zgodne z zalecanymi (PN-B-06265:2022-08 tabela F.2) obszarami zastosowań.

ABSTRACT

Concrete is a widely used material in the construction industry, which, should ensure the durability of the structure maintaining its performance properties for as long as possible. Recently, by dynamic changes in the market of construction materials, the use of reduced emission cements in concrete has increased. When designing the composition of a concrete mix, it is necessary to consider the effect of the type of cement used and the type II additive on the mechanical and durability properties of concrete and concrete structures.

The subject of the paper was the evaluation of the influence of the k-factor on the carbonation process and the compressive strength of concrete. The carbonation process was carried out in accordance with the EN 12390-12:2020 standard. The project used cements from Cement Ożarów S.A. with the following non-clinker main ingredients: granulated blast furnace slag (S) and silica fly ash (V). The cements were in accordance with the requirements of EN 197-1. The subject of the study was concrete designed based on exposure classes XC2 and XC4. The designed concrete mixtures were based on formulations made with cement and Type II additives. As a reference, the recommended limits of CEM II/A cement were used when using a mineral additive in accordance with PN-EN 450-1. An analysis of the performance of CEM II/B or CEM III/A cements in comparison with the reference solution was performed. Concrete reference mixtures, for the intended application, meet the standard requirements (PN-B-06265:2022-08 table F.1) in relation to the recommended limits for the composition and properties of concrete. The cements used

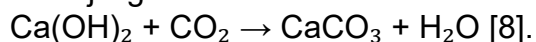
in the reference mixtures comply with the recommended (PN-B-06265:2022-08 table F.2) application areas.

1. WSTĘP

Konstrukcje budowlane, zgodnie z obowiązującymi normami, projektowane są tak, aby zapewnić trwałość w określonym czasie ich eksploatacji [1]. Na zachowanie właściwości konstrukcji wpływ mają czynniki mechaniczne, jak również procesy korozji betonu i stali zbrojeniowej, w tym przede wszystkim dwutlenku węgla i siarki lub roztworów zawierających chlorki i siarczany [2-5]. Jedną z głównych przyczyn korozji elementów żelbetowych jest karbonatyzacja. Prowadzi ona do zmniejszenia pH betonu do poziomu mniejszego od 11 i depasywacji stali zbrojeniowej [2, 5-7]. Karbonatyzacja polega na reakcji dwutlenku węgla (CO_2) zawartego w powietrzu z wodorotlenkiem wapnia (portlandytu - $\text{Ca}(\text{OH})_2$) obecnym w zaczynie cementowym, co prowadzi do powstania węglanu wapnia (CaCO_3) i stopniowego obniżenia alkaliczności matrycy cementowej. Proces ten rozpoczyna się od zewnętrznych warstw betonu mających bezpośredni kontakt z atmosferą, a następnie, wraz z upływem czasu, postępuje w głąb materiału. W warunkach eksploatacyjnych wszystkie elementy konstrukcyjne wykonane z żelbetu, które pozostają w kontakcie z powietrzem, podlegają stałemu oddziaływaniu dwutlenku węgla. Skutkiem tego może być zmniejszenie pH środowiska porowego, co z kolei prowadzi do depasywacji stali zbrojeniowej i inicjacji procesów korozyjnych. Dlatego ocena odporności betonu na karbonatyzację stanowi istotny element analizy jego trwałości w długim okresie użytkowania [1-7]. Wykorzystywanie cementów o obniżonym śladzie węglowym pozwala na zmniejszenie obciążenia środowiskowego zachowując przy tym właściwości wytrzymałościowe oraz trwałościowe betonu.

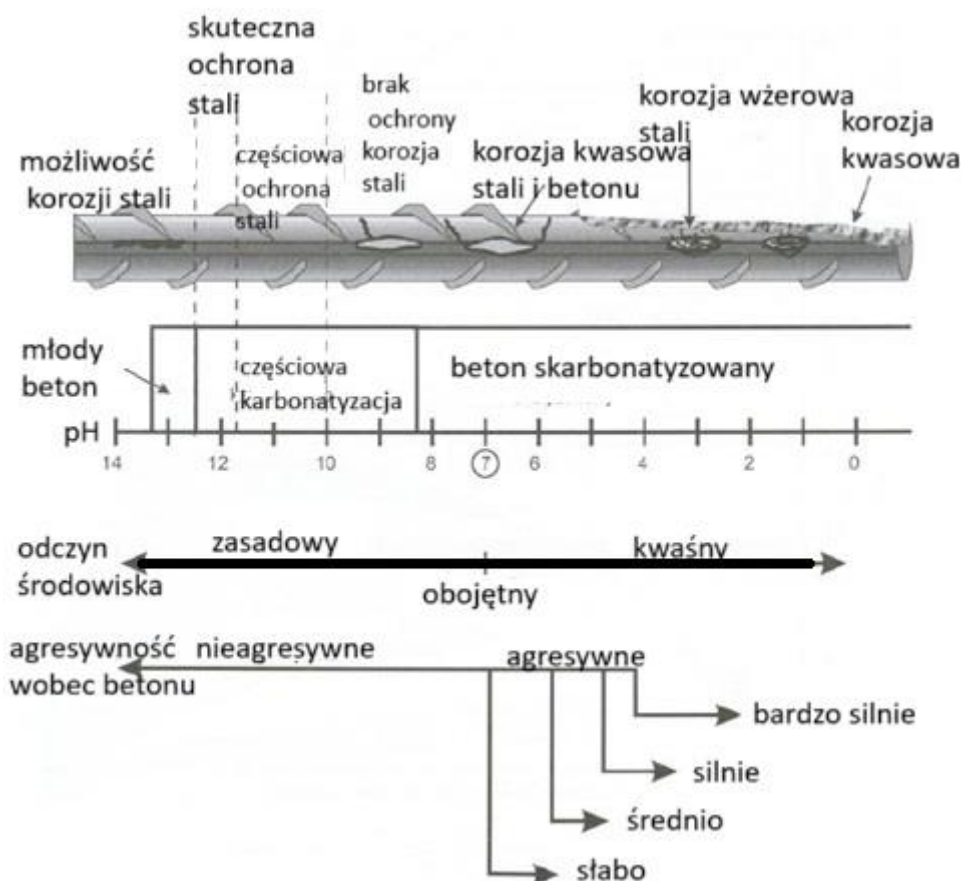
1.1 Mechanizm karbonatyzacji betonu

Karbonatyzacja to proces chemiczny zachodzący w betonie w obecności wilgoci i dwutlenku węgla z atmosfery, który polega na reakcji CO_2 ze zhydratyzowanymi składnikami zaczynu cementowego. Głównym reagentem jest portlandyt, który ulega reakcji zgodnie z równaniem:



Po wyczerpaniu portlandytu karbonatyzacji ulegają również inne składniki zaczynu cementowego, takie jak uwodniony krzemian wapnia (fazy C-S-H), uwodnione gliniany (C-S-A-H) i siarczanogliniany wapniowe (C-A-S) [8,9]. Produktem karbonatyzacji fazy C-S-H jest pozbawiony właściwości wytrzymałościowych żel krzemionkowy, który odkłada się w porach większych niż 100 nm, sprzyjając dalszej dyfuzji CO_2 [2,10]. Choć tworzenie się kalcytu nie powoduje bezpośredniego niszczenia betonu, prowadzi do znacznego obniżenia pH cieczy w porach – z wartości 12,6–13,5 do poziomu około 9, a w skrajnych przypadkach nawet niżej [11,12].

Obniżenie pH jest szczególnie niebezpieczne dla konstrukcji żelbetowych. Po osiągnięciu przez front karbonatyzacji powierzchni zbrojenia, dochodzi do utraty ochronnej warstwy pasywacyjnej – która przestaje istnieć przy $\text{pH} < 11,8$ [13]. W obecności wilgoci i tlenu możliwa jest wtedy korozja stali zbrojeniowej [14]. Produkty korozji mają większą objętość niż stal, co powoduje powstawanie naprężeń na styku stal–beton. Przekroczenie wytrzymałości betonu na rozciąganie prowadzi do powstawania mikropęknięć, ich propagacji, a następnie do odspajania otuliny, co znacząco obniża trwałość konstrukcji [12].



Rys.1. Wpływ pH środowiska na możliwość wystąpienia korozji [27].

Proces karbonatyzacji zależy od szeregu czynników, które dzielą się na wewnętrzne i zewnętrzne.

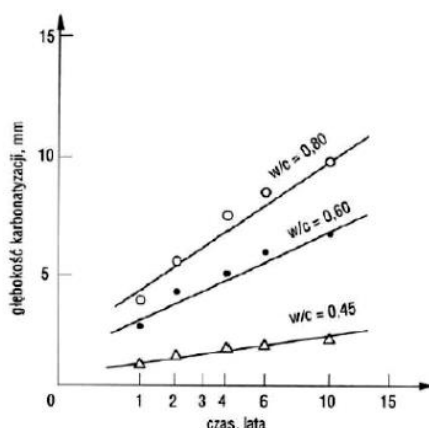
Do najważniejszych zewnętrznych czynników środowiskowych należą:

- Wilgotność względna powietrza – karbonatyzacja najszybciej zachodzi w zakresie 50–70% wilgotności. W suchym środowisku brakuje wody do rozpuszczenia CO_2 , natomiast w środowisku nasyconym wodą dyfuzja CO_2 jest ograniczona ze względu na wypełnienie porów wodą [2,13-14].
- Stężenie CO_2 – typowo wynosi ono około 0,03% objętości, ale w obszarach zurbanizowanych może dochodzić do 1%, co znacząco przyspiesza karbonatyzację [10,14].
- Temperatura otoczenia – jej wzrost zwiększa szybkość dyfuzji CO_2 poprzez termiczne rozszerzenie porów betonu [2,10,15].
- Czas ekspozycji, agresywność środowiska, orientacja konstrukcji, a także klasa ekspozycji wg PN-EN 206 i PN-B-06265 – największe zagrożenie dotyczy klasy XC4, czyli środowiska o zmiennym stopniu nasycenia wilgocią [16-17].

Najistotniejszym czynnikiem wewnętrznym wpływającym na szybkość karbonatyzacji jest dyfuzyjność zaczynu cementowego, która zależy od jego mikrostruktury i układu porów [8,18]. Czynniki te determinują przepuszczalność i szczelność betonu, a tym samym jego podatność na karbonatyzację. Najważniejsze z nich to:

- Stosunek wodno-cementowy (w/c) – wyższe w/c powoduje większą porowatość, co sprzyja karbonatyzacji [12,18].

- Rodzaj i ilość cementu – cementy o wyższej zawartości klinkieru generują większe ilości Ca(OH)_2 , który jako pierwszy reaguje z CO_2 . Niższa zawartość klinkieru prowadzi do mniejszej ilości Ca(OH)_2 i zwiększonej porowatości betonu [2,14,19].
- Stopień hydratacji cementu, początkowa pielęgnacja betonu – właściwa pielęgnacja ogranicza karbonatyzację poprzez zapewnienie ciągłości procesu hydratacji i szczelnej mikrostruktury [14,20].



Rys.2. Zależność głębokości (postępu) karbonatyzacji od stosunku wodno-cementowego [26].

Choć w literaturze często spotyka się stwierdzenie, że szybkość karbonatyzacji jest odwrotnie proporcjonalna do wytrzymałości na ściskanie betonu, uproszczony model nie uwzględnia wpływu mikrostruktury warstwy przypowierzchniowej i jej znaczenia dla dyfuzji CO_2 [2,14,19]. Proces karbonatyzacji, mimo zagrożeń związanych z korozją zbrojenia, może mieć również efekty pozytywne. Kalcyt powstający w wyniku karbonatyzacji ma o ok. 11% większą objętość niż portlandyt i jest ponad 100 razy mniej rozpuszczalny [10,14,20-22]. W betonach wykonanych z cementu portlandzkiego (CEM I) może to prowadzić do doszczelnienia strefy przypowierzchniowej ograniczając dyfuzyjność oraz poprawiając wytrzymałość [22-25].

2. Badania

W ramach programu badawczego zweryfikowano wpływ czynników takich jak: rodzaj cementu, dodatku typu II (popiołu lotnego krzemionkowego) oraz W/S na szybkość karbonatyzacji. W celu oceny właściwości trwałościowych betonów wykonanych z cementów o obniżonym śladzie węglowym, zaprojektowano mieszanki o zróżnicowanym przeznaczeniu aplikacyjnym. Uwzględniono dwa typy środowisk korozyjnych związanych z karbonatyzacją: pierwszy z nich to beton w klasie ekspozycji XC2, narażony na korozję wywołaną karbonatyzacją w środowisku wilgotnym, okresowo suchym. W praktyce jest to beton stosowany w elementach konstrukcyjnych mających długotrwały kontakt z wodą, takich jak fundamenty. Kolejny to beton w klasie ekspozycji XC4, narażony na korozję w warunkach cyklicznego nawilżania i wysychania. Ten rodzaj betonu znajduje zastosowanie w elementach takich jak ściany, słupy czy stropy.

2.1 Materiały i metody badań

Do badań wykorzystano następujące materiały: cementy Cement Ożarów S.A. (tab.1.), popiół lotny krzemionkowy, piasek 0/2, grys 2/8, 8/16, plastifikator, oraz

superplastyfikator na bazie polikarboksylianów. Receptury projektowano kierując się warunkami i wymaganiami normowanymi uwzględniając również aspekty ekonomiczne i rynkowe (tab.2). Składy mieszanek betonowych zostały zaprojektowane zgodnie z zalecanymi wartościami granicznymi dotyczące składu oraz właściwości betonu ujętych w PN-B-06265 dla klasy ekspozycji XC2 i XC4.

Tablica 1. Rodzaje i charakterystyka cementów użytych w badaniach

Cement (rodzaj)	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		Zawartość normowa nieklinkierowych składników głównych [%]
	2 dni	28 dni	
CEM II/A-V 42,5R-NA	25,9	54,1	6-20
CEM II/B-V 42,5 R	24,8	52,1	21-35
CEM II/B-S 42,5-R NA	24,1	58,4	21-35
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	12,1	51,5	36-65

W celu określenia odporności na karbonatyzację oraz innych właściwości użytkowych betonów niskoemisyjnych zaprojektowano 3 składy mieszanki betonowej, spełniające wymagania klas ekspozycji XC2 oraz XC4 wg normy PN-B-06265. Projektowane betony komponowane były również z dodatkiem typu II zgodnie z zapisami normy PN-EN 206 w postaci krzemionkowego popiołu lotnego. Minimalna ilość popiołu wyliczana była zgodnie z dokumentem CEN/TR 16639 wyliczając w każdym rozwiązaniu stosunek w/c z uwzględnieniem dodatku typu II. Receptury na bazie CEM II/A-V 42,5R-NA przy maksymalnym w/c zgodnie z tablicą 2 posłużyły jako referencja. Udział procentowy kruszyw w obrębie każdej klasy ekspozycji był na tym samym poziomie.

Tablica 2. Wymagania odnośnie składu i właściwości betonu w klasach ekspozycji XC w normie PN-EN 206 [13]

Klasa ekspozycji	Korozja spowodowana karbonatyzacją	
	XC2	XC4
Maksymalne w/c	0,65	0,55
Minimalna klasa wytrzymałości	C16/20	C25/30
Minimalna zawartość cementu	280	300
Minimalna zawartość CEM II/A przy stosowaniu CEM dodatku mineralnego	260	280

Wykonano próbki zgodnie z normą PN-EN 12350-1:2019:07 oraz przechowywano zgodnie z PN-EN 12390-2:2019-07. Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono według PN-EN 12390-3:2019-07. Głębokość karbonatyzacji wyznaczono metodą przyspieszoną ujętą w normie PN-EN 12390-12:2020-06.

3. WYNIKI BADAŃ

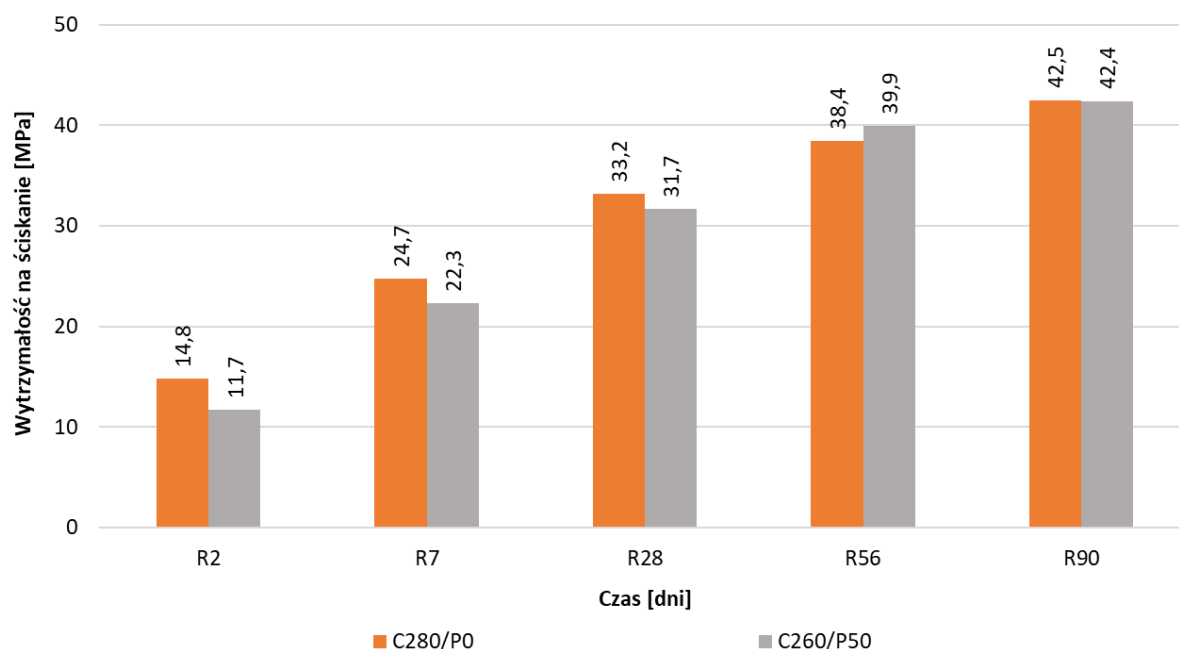
Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie oraz średniej głębokości na karbonatyzację przedstawiono na rysunkach 3-10 oraz w tablicach 3-10 dla poszczególnych rodzajów cementów w klasie ekspozycji XC2 i XC4. Wartości wielkości głębokości karbonatyzacji przedstawiono po 70 dniach wraz ze współczynnikami determinacji, które wskazują o poprawności przeprowadzenia badania. Zgodnie z zapisami normowymi powinien być większy niż 0,95.

CEM II/A-V 42,5 R-NA klasa ekspozycji XC2

Na rysunku 3 oraz w tablicy 3 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz średniej głębokości karbonatyzacji po 70 dniach cementu CEM II/A-V 42,5 R-NA w klasie ekspozycji XC2.

Tablica 3. Głębokość karbonatyzacji i wytrzymałość na ściskanie betonów na bazie CEM II/A-V 42,5R-NA (C280/P0), z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C260/P50).

Oznaczenie mieszanki betonowej	Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego	Głębokość karbonatyzacji d_{k70} [mm]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				
			2	7	28	56	90
C280/P0	-	17,4	14,8	24,7	33,2	38,4	42,5
C260/P50	50	19,0	11,7	22,3	31,7	39,9	42,4



Rysunek 3. Wytrzymałość na ściskanie CEM II/A-V 42,5 R-NA.

Wykres przedstawia wytrzymałość na ściskanie dwóch mieszanek betonowych wykonanych na cemencie CEM II/A-V 42,5 R-NA (C280/P0) oraz z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C260/P50) po określonym czasie dojrzewania betonu przy takim samym stosunku w/c wynoszącym 0,65. Po 2 dniach wytrzymałość mieszanki C280/P0 jest wyższa niż C260/P50. Wytrzymałość na ściskanie betonu wykonanego

na cemencie CEM II/A-V 42,R-NA wynosi 42,5 MPa i jest niemal identyczna jak dla mieszanki betonowej C260/P50 po 90 dniach dojrzewania.

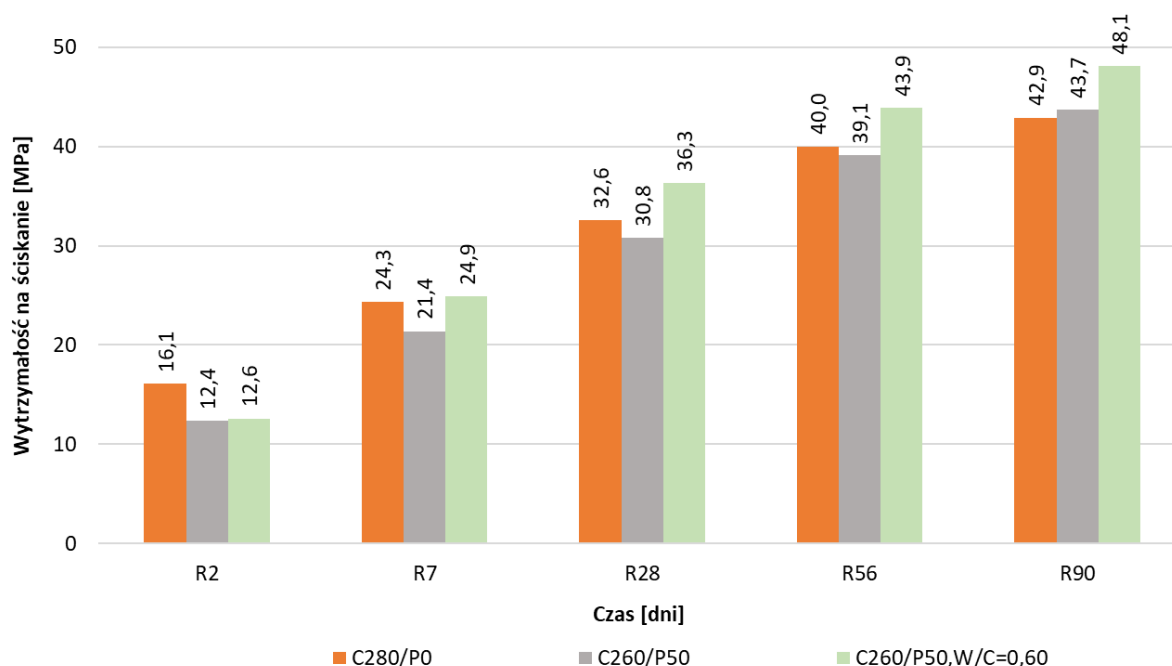
Głębokość karbonatyzacji zależy od składu mieszanki betonowej, na który wpływ ma obecność popiołu lotnego krzemionkowego. Dla betonu C280/P0 głębokość karbonatyzacji wyniosła 17,4 mm przy współczynniku determinacji 0,999, a dla C260/P50 19,0 mm również przy takiej samej wartości współczynnika determinacji.

CEM II/B-V 42,5 R klasa ekspozycji XC2

Na rysunku 4 oraz w tablicy 4 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz średniej głębokości karbonatyzacji po 70 dniach cementu CEM II/B-V 42,5 R w klasie ekspozycji XC2.

Tablica 4. Głębokość karbonatyzacji i wytrzymałość na ściskanie betonów na bazie CEM II/B-V 42,5R(C280/P0), z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C260/P50) oraz przy obniżonym W/C (C260/P50,W/C=0,60) w klasie ekspozycji XC2.

Oznaczenie mieszanki betonowej	Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego	Głębokość karbonatyzacji d_{k70} [mm]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				
			2	7	28	56	90
C280/P0	-	19,0	16,1	24,3	32,6	40,0	42,9
C260/P50	50	20,9	12,4	21,4	30,8	39,1	43,7
C260/P50 W/C 0,60	50	18,8	12,6	24,9	36,3	43,9	48,1



Rysunek 4. Wytrzymałość na ściskanie CEM II/B-V 42,5 R.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że po 2 dniach dojrzewania beton referencyjny (C280/P0 na cemencie CEM II/B-V 42,5 R) wykazał najwyższą wytrzymałość na ściskanie (16,1 MPa) w porównaniu do betonu CEM II/B-V z popiołem (12,4 MPa) oraz z dodatkiem popiołu i obniżonym W/C (12,6 MPa). Po 7 dniach beton C260/P50, W/C=0,60 uzyskał lepsze parametry mechaniczne w porównaniu do C280/P0 i C260/P50 z W/C=0,65, co było widoczne w późniejszych etapach dojrzewania. Po 90 dniach C260/P50, W/C=0,60 osiągnął wytrzymałość 48,1 MPa, przewyższając wartość 42,9 MPa uzyskaną przez beton wykonany wyłącznie na CEM II/B-V 42,5 R (C280/P0).

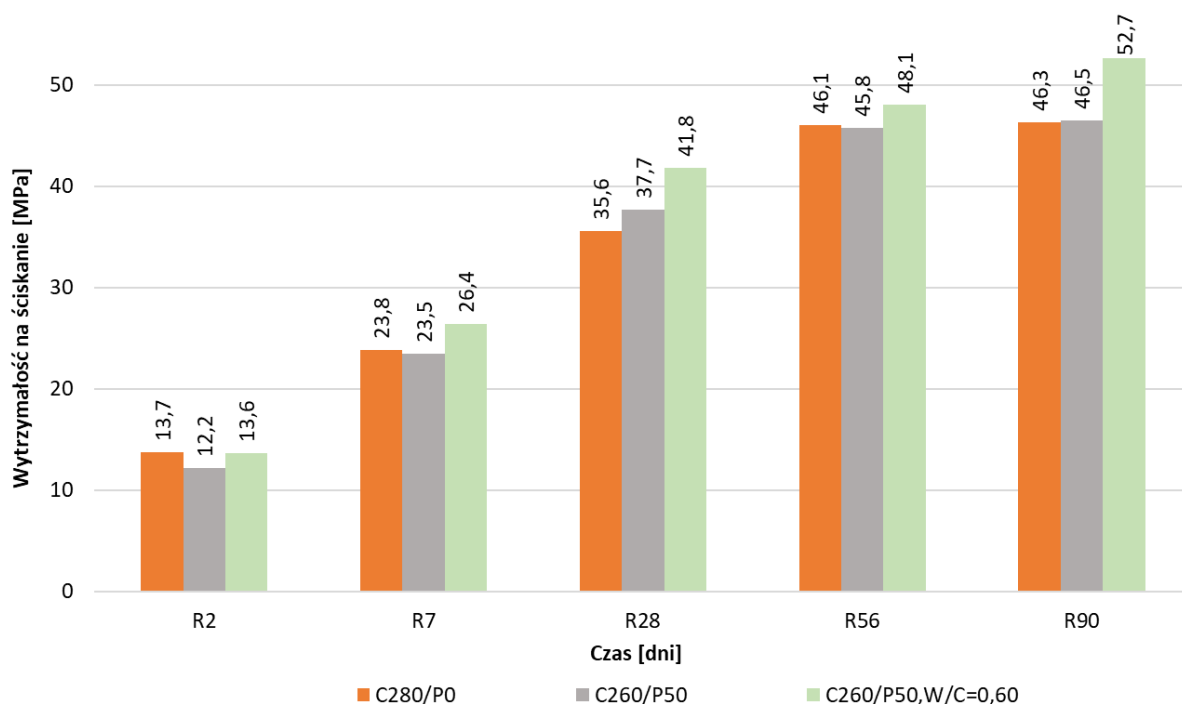
Równolegle przeprowadzono ocenę odporności mieszanek na karbonatyzację. Głębokość penetracji CO₂ po 70 dniach w komorze była większa w przypadku betonu C280/P0 i C260/50 wyniosła odpowiednio 19 mm i 20,9 mm przy współczynnikach determinacji 0,999 oraz 0,995. Obniżenie stosunku W/C sprawia, że wielkość frontu karbonatyzacji zmniejsza się do 18,8 mm przy współczynniku determinacji 0,996.

CEM II/B-S 42,5 R-NA klasa ekspozycji XC2

Na rysunku 5 oraz w tablicy 5 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz średniej głębokości karbonatyzacji po 70 dniach cementu CEM II/B-S 42,5 R-NA w klasie ekspozycji XC2.

Tablica 5. Głębokość karbonatyzacji i wytrzymałość na ściskanie betonów na bazie CEM II/B-S 42,5R-NA (C280/P0), z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C260/P50) oraz przy obniżonym W/C (C260/P50, W/C=0,60) w klasie ekspozycji XC2.

Oznaczenie mieszanki betonowej	Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego	Głębokość karbonatyzacji d_{k70} [mm]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				
			2	7	28	56	90
C280/P0	-	16,3	13,7	23,8	35,6	46,1	46,3
C260/P50	50	15,0	12,2	23,5	37,7	45,8	46,5
C260/P50 W/C 0,60	50	13,5	13,6	26,4	41,8	48,1	52,7



Rysunek 5. Wytrzymałość na ściskanie CEM II/B-S 42,5 R-NA.

Na rysunku 5 przedstawiono wytrzymałość na ściskanie betonu wykonanego na cemencie CEM II/B-S 42,5 R-NA (C280/P0), z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C260/P50) oraz z popiołem lotnym i obniżonym W/C (C260/P50, W/C=0,60). Dodatek popiołu lotnego krzemionkowego wpływa na wytrzymałość na ściskanie w początkowym okresie i wartość ta jest niższa niż dla betonu referencyjnego (C280/P0) z W/C na poziomie 0,65. Najwyższą wytrzymałość na ściskanie uzyskano dla próbki C260/P50, W/C=0,60 równą 52,7 MPa po 90 dniach dojrzewania.

Głębokość penetracji CO₂ była większa w przypadku C280/P0 oraz C260/P50 przy wyższym W/C o 0,05 i wyniosła odpowiednio 16,3 i 15,0 mm przy współczynnikach determinacji 0,994 oraz 1,000, podczas gdy dla mieszanki C260/50, W/C=0,60 wartość ta osiągnęła 13,5 mm przy współczynniku determinacji 1,000.

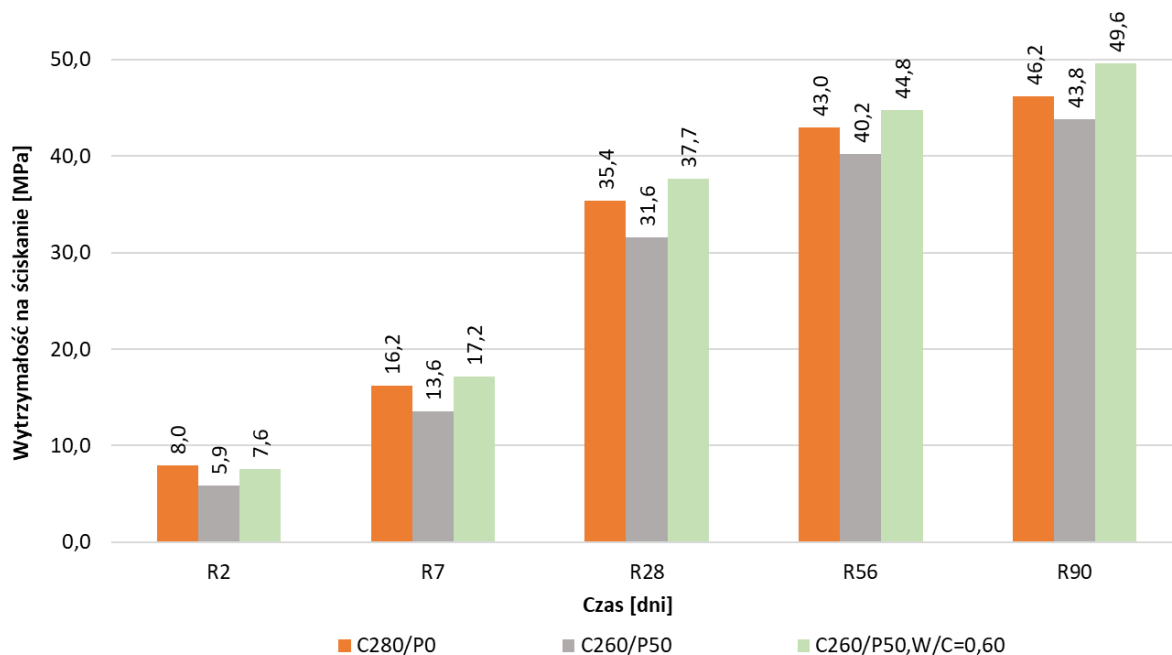
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA klasa ekspozycji XC2

Na rysunku 6 oraz w tablica 6 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz średniej głębokości karbonatyzacji po 70 dniach cementu CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA w klasie ekspozycji XC2.

Tablica 6. Głębokość karbonatyzacji i wytrzymałość na ściskanie betonów na bazie CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA (C280/P0), z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C260/P50) oraz przy obniżonym W/C (C260/P50, W/C=0,60) w klasie ekspozycji XC2.

Oznaczenie mieszanki betonowej	Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego	Głębokość karbonatyzacji d_{k70} [mm]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				
			2	7	28	56	90
C280/P0	-	17,1	8,0	16,2	35,4	43,0	46,2
C260/P50	50	18,2	5,9	13,6	31,6	40,2	43,8

C260/P50 W/C 0,60	50	16,5	7,6	17,2	37,7	44,8	49,6
----------------------	----	------	-----	------	------	------	------



Rysunek 6. Wytrzymałość na ściskanie dla CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA.

Na rys.6 przedstawiono wytrzymałość na ściskanie betonu wykonanego na cemencie CEM II/B-S 42,5 R-NA (C280/P0) z W/C=0,65, z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C260/P50) z W/C=0,65 oraz z popiołem lotnym i obniżonym W/C (C260/P50, W/C=0,60). Po 2 dniach najwyższą wytrzymałość uzyskano dla C280/P0 równą 8,0 MPa. Najwyższą wytrzymałość na ściskanie uzyskano dla próbki C260/P50, W/C=0,60 i wyniosła ona 49,6 MPa po 90 dniach. Dla betonu C280/P0 i C260/P50 wytrzymałość na ściskanie wyniosła odpowiednio 46,2 MPa i 43,8 MPa.

Głębokość penetracji CO₂ była większa w przypadku C280/P0 i C260/P50 przy W/C=0,65 i wyniosła odpowiednio 17,1 mm i 18,2 mm, podczas gdy dla mieszanki C260/P50, W/C=0,60 wartość ta osiągnęła 16,5 mm. Współczynnik determinacji dla każdej receptury wynosił 0,999.

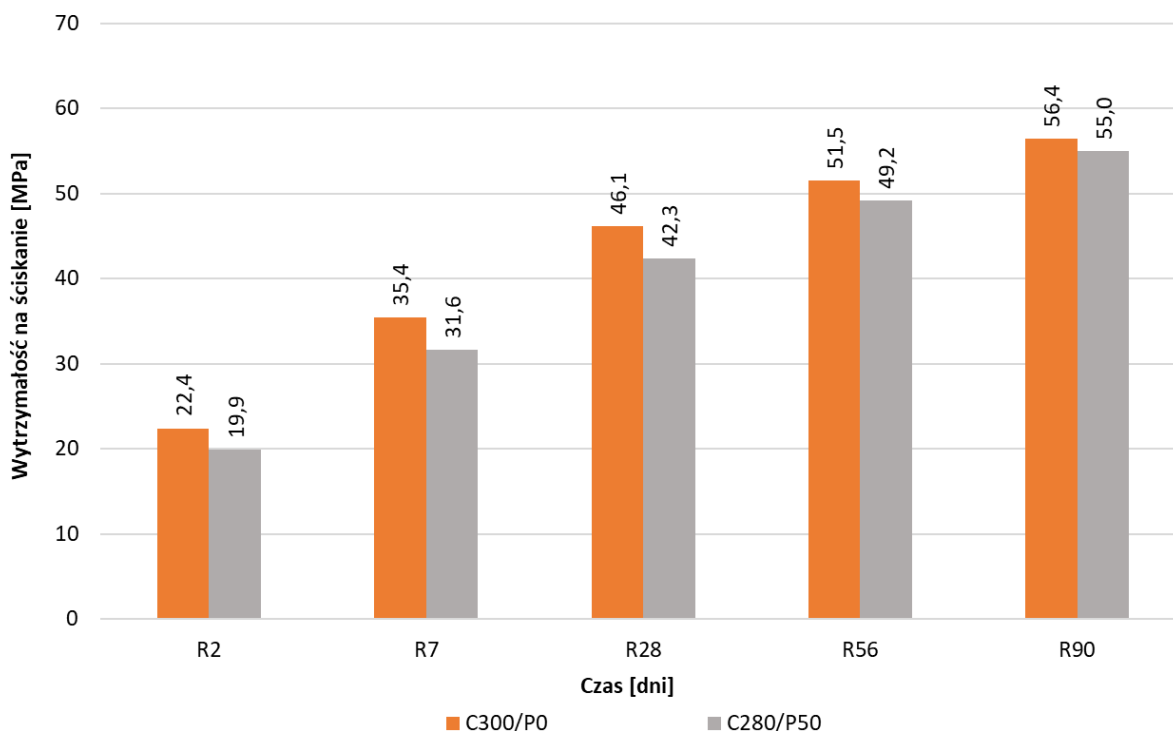
CEM II/A-V 42,5 R-NA klasa ekspozycji XC4

Na rysunku 7 oraz w tablicy 7 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz średniej głębokości karbonatyzacji po 70 dniach cementu CEM II/A-V 42,5 R-NA w klasie ekspozycji XC4.

Tablica 7. Głębokość karbonatyzacji i wytrzymałość na ściskanie betonów na bazie CEM II/A-V 42,5R-NA (C300/P0), z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C280/P50) w klasie ekspozycji XC4.

Oznaczenie mieszanki betonowej	Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego	Głębokość karbonatyzacji d_{k70} [mm]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				
			2	7	28	56	90
C300/P0	-	11,8	22,4	35,4	46,1	51,5	56,4

C280/P50	50	13,9	19,9	31,6	42,3	49,2	55,0
----------	----	------	------	------	------	------	------



Rysunek 7. Wytrzymałość na ściskanie dla CEM II/A-V 42,5 R-NA.

Wykres przedstawia wytrzymałość na ściskanie dwóch mieszanek betonowych wykonanych na cemencie CEM II/A-V 42,5 R-NA (C300/P0) oraz z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C280/P50) po określonym czasie dojrzewania betonu. Po 2, 7, 28, 56 oraz 90 dniach najwyższą wytrzymałość na ściskanie uzyskano dla próby C300/P0, wynoszącą odpowiednio 22,4 MPa, 35,4 MPa, 46,1 MPa, 51,5 MPa oraz 56,4 MPa. Najniższą wytrzymałość uzyskano dla próbki z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego C280/P50.

Głębokość karbonatyzacji zależy od składu mieszanki betonowej, na który wpływ ma obecność popiołu lotnego krzemionkowego. Dla betonu C300/P0 głębokość karbonatyzacji wyniosła 11,8 mm oraz dla C280/P50 13,9 mm przy współczynnikach determinacji na poziomie 0,996 i 0,999.

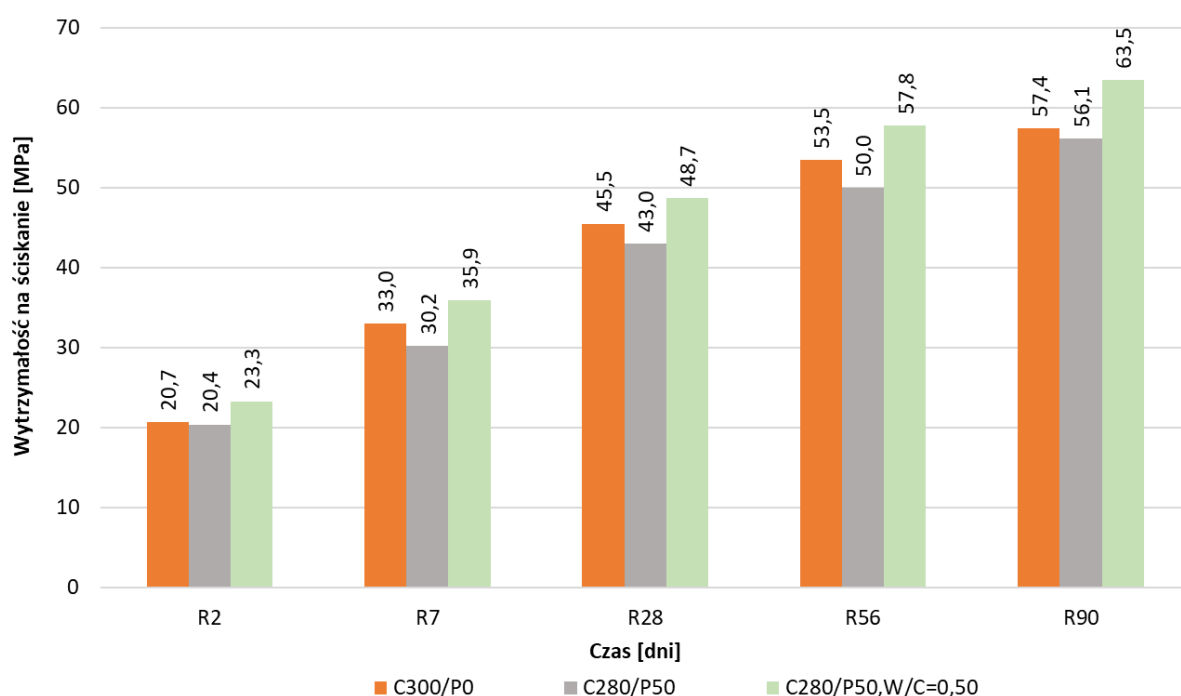
CEM II/B-V 42,5 R klasa ekspozycji XC4

Na rysunku 8 oraz w tablicy 8 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz średniej głębokości karbonatyzacji po 70 dniach cementu CEM II/B-V 42,5 R w klasie ekspozycji XC4.

Tablica 8. Głębokość karbonatyzacji i wytrzymałość na ściskanie betonów na bazie CEM II/B-V 42,5 R (C300/P0), z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C280/P50) oraz przy obniżonym W/C (C280/P50, W/C=0,50) w klasie ekspozycji XC4.

Oznaczenie mieszanki betonowej	Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego	Głębokość karbonatyzacji d_{k70} [mm]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				
			2	7	28	56	90

C300/P0	-	13,9	20,7	33,0	45,5	53,5	57,4
C280/P50	50	16,3	20,4	30,2	43,0	50,0	56,1
C280/P50 W/C=0,50	50	12,8	23,6	39,4	56,6	62,5	63,6



Rysunek 8. Wytrzymałość na ściskanie CEM II/B-V 42,5 R.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że po 2 dniach dojrzewania beton z dodatkiem popiołu i obniżonym W/C (C280/P50, W/C=0,50 na cemencie CEM II/B-V 42,5 R) wykazywał wyższą wytrzymałość na ściskanie (23,3 MPa) w porównaniu do betonu referencyjnego (20,7 MPa) ora z dodatkiem popiołu C280/P50 (20,4 MPa) przy W/C=0,55. Trend ten utrzymuje się po 7,28,56 oraz 90 dniach. Po 90 dniach wytrzymałość na ściskanie dla C300/P0, C280/P50 oraz C280/P50, W/C=0,50 wynosi odpowiednia 57,4 MPa, 56,1 MPa oraz 63,5 MPa.

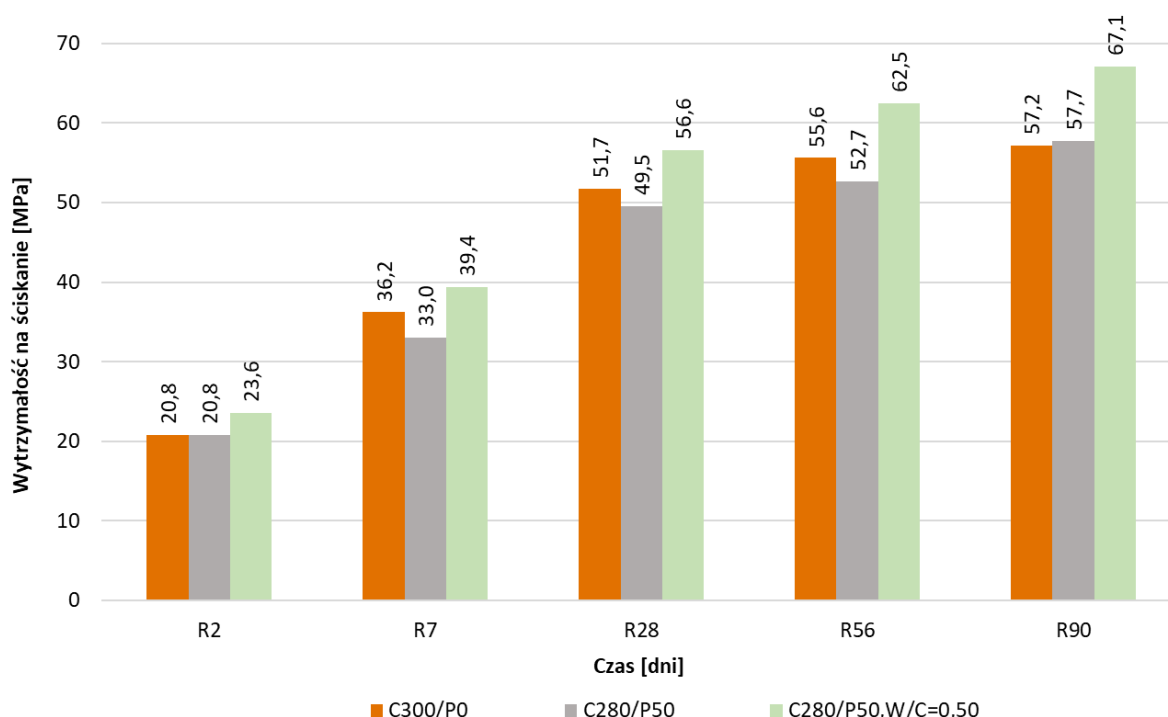
Równolegle przeprowadzono ocenę odporności mieszanek na karbonatyzację. Głębokość penetracji CO₂ była większa w przypadku betonów C280/P50 oraz C300/P0, i wyniosła odpowiednio 16,3 i 13,9 mm przy współczynnikach determinacji 0,996 oraz 0,995, podczas gdy dla betonu C280/P50, W/C=0,50 wartość ta osiągnęła 12,8 mm przy współczynniku determinacji 0,994.

CEM II/B-S 42,5 R-NA klasa ekspozycji XC4

Na rysunku 9 oraz w tablicy 9 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz średniej głębokości karbonatyzacji po 70 dniach cementu CEM II/B-S 42,5 R-NA w klasie ekspozycji XC4.

Tablica 9. Głębokość karbonatyzacji i wytrzymałość na ściskanie betonów na bazie CEM II/B-S 42,5R-NA (C300/P0), z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C280/P50) oraz przy obniżonym W/C (C280/P50, W/C=0,50) w klasie ekspozycji XC4.

Oznaczenie mieszanki betonowej	Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego	Głębokość karbonatyzacji d_{k70} [mm]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				
			2	7	28	56	90
C300/P0	-	10,7	20,8	36,2	51,7	55,6	57,2
C280/P50	50	11,3	20,8	33,0	49,5	52,7	57,7
C280/P50 W/C 0,50	50	9,6	23,6	39,4	56,6	62,5	67,1



Rysunek 9. Wytrzymałość na ściskanie dla CEM II/B-S 42,5 R-NA.

Na rys.9 przedstawiono wytrzymałość na ściskanie betonu wykonanego na cemencie CEM II/B-S 42,5 R-NA (C300/P0) z W/C=0,55, z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C280/P50) również z W/C=0,55 oraz z popiołem i obniżonym W/C (C280/P50, W/C=0,55). Najwyższą wytrzymałość na ściskanie uzyskano dla próbki C280/P50, W/C=0,55 i wyniosła ona 67,1 MPa po 90 dniach dojrzewania. Dla pozostałych próbek C300/P0 oraz C280/P50 z W/C=0,55 wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach była odpowiednio równa 57,2 MPa i 57,7 MPa.

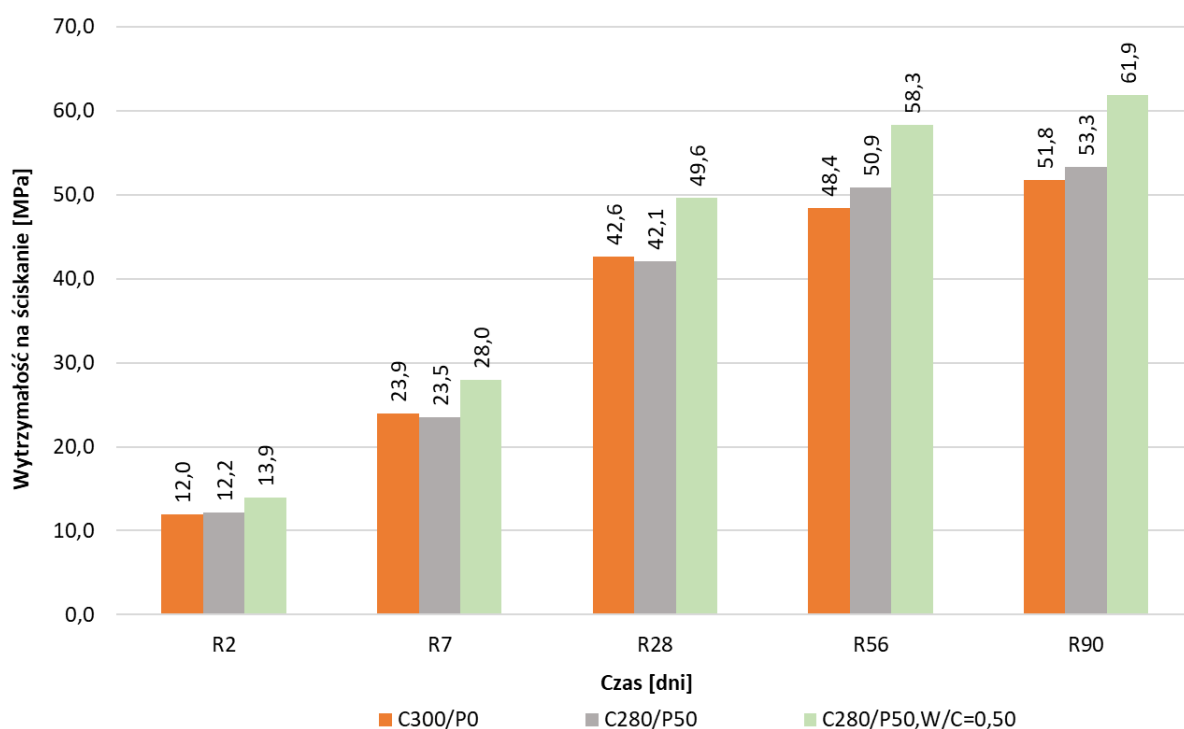
Głębokość penetracji CO₂ była większa w przypadku C300/P0 i C280/P50 i wyniosła odpowiednio 10,7 i 11,3 mm przy współczynnikach determinacji 0,998 oraz 0,1,000, podczas gdy dla mieszanki C280/P50, W/C=0,50 wartość ta osiągnęła 9,6 mm przy współczynniku determinacji 0,995.

CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA klasa ekspozycji XC4

Na rysunku 10 oraz w tablicy 10 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz średniej głębokości karbonatyzacji po 70 dniach cementu CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA w klasie ekspozycji XC4.

Tablica 10. Głębokość karbonatyzacji i wytrzymałość na ściskanie betonów na bazie CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA (C300/P0), z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C280/P50) oraz przy obniżonym W/C (C280/P50,W/C=0,50) w klasie ekspozycji XC4.

Oznaczenie mieszanki betonowej	Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego	Głębokość karbonatyzacji d_{k70} [mm]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				
			2	7	28	56	90
C300/P0	-	12,2	12,0	23,9	42,6	48,4	51,8
C280/P50	50	13,2	12,2	23,5	42,1	50,9	53,3
C280/P50 W/C 0,50	50	11,9	13,9	28,0	49,6	58,3	61,9



Rysunek 10. Wytrzymałość na ściskanie dla CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA.

Na rys.10 przedstawiono wytrzymałość na ściskanie betonu wykonanego na cemencie CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA (C300/P0) z W/C=0,55, z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego (C280/P50) z W/C=0,55 oraz z popiołem i obniżonym W/C (C280/P50, W/C=0,50). Na wytrzymałość na ściskanie wpływ ma zawartość popiołu lotnego krzemionkowego oraz stosunek W/C. Najwyższą wytrzymałość na ściskanie uzyskano dla próbki C280/P50, W/C=0,50 i wyniosła ona 61,9 MPa po 90 dniach. Najniższą wytrzymałość uzyskano dla C300/P0 równą 51,8 MPa. Wytrzymałość betonu C280/P50 wyniosła 53,3 MPa i była o 1,5 MPa wyższa niż dla próbki C300/P0 gdzie W/C wynosiło 0,55.

Głębokość penetracji CO₂ była większa w przypadku C280/P50 i wyniosła 13,2mm przy współczynniku determinacji 0,998, dla cementu CEM II/A 42,5 N-LH/HSR/NA bez dodatku popiołu (C300/P0) równa była 12,2 mm przy współczynniku 0,999, podczas gdy dla mieszanki C280/P50,W/C=0,50 wartość ta osiągnęła 11,9 mm przy współczynniku determinacji 1,000.

4. WNIOSKI

W pracy przeanalizowano wpływ rodzaju cementu, dodatku popiołu lotnego krzemionkowego oraz stosunku wodno-cementowego (W/C) na postęp karbonatyzacji i wytrzymałość na ściskanie betonów o obniżonym śladzie węglowym, projektowanych w klasach ekspozycji XC2 i XC4. Uzyskane wyniki potwierdziły, że obniżenie wskaźnika W/C przy jednoczesnym zastosowaniu dodatku typu II pozwalają uzyskać korzystne właściwości mechaniczne, przy jednoczesnym zmniejszeniu frontu karbonatyzacji. Przeprowadzone badania wskazują, że możliwe jest znalezienie konsensu wymagań trwałościowych i środowiskowych poprzez odpowiedni dobór składu betonu z wykorzystaniem cementów o obniżonej zawartości klinkieru.

Badania potwierdziły, że karbonatyzacja betonu zależy od: rodzaju cementu (CEM II/A-V, CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM III/A), obecności dodatków typu II (popiół lotny krzemionkowy) oraz wskaźnika W/C. Tym samym przedstawiono, że cement z grupy CEM II/B – CEM II/B-S 42,5 R wykazał mniejszy front karbonatyzacji względem CEM II/A-V 42,5 R-NA, jednak przez zapisy normy nie możemy zmniejszyć ilości cementu przy wykorzystaniu dodatku typu II zgodnie z tabelą 2 bez przeprowadzenia dodatkowych badań.

Zgodnie z literaturą [8,22], niższy W/C prowadzi do zagęszczenia mikrostruktury betonu, co ogranicza dyfuzję CO₂ i spowalnia karbonatyzację. Wyniki badań potwierdzają tę zależność – mieszanki z dodatkiem popiołu oraz obniżonym W/C = 0,60 w przypadku XC2 oraz 0,50 dla XC4 wykazywały najmniejszą głębokość karbonatyzacji, niezależnie od rodzaju cementu.

Dodatek popiołu lotnego krzemionkowego zwiększa głębokość karbonatyzacji, co jest zgodne z badaniami [9,10]. Wynika to z: mniejszej zawartości portlandytu, czy większej porowatości początkowej. Jednakże, jak pokazano w pracy, efekt ten można skutecznie kompensować przez redukcję W/C, co pozwala zachować trwałość przy jednoczesnym obniżeniu śladu węglowego.

Zastosowanie cementów o obniżonej zawartości klinkieru (np. CEM III/A) oraz dodatków typu II pozwala na: redukcję emisji CO₂, zachowanie lub poprawę właściwości mechanicznych, kontrolę procesu karbonatyzacji poprzez optymalizację W/C. To potwierdza tezę o możliwości pogodzenia wymagań środowiskowych i trwałościowych, co wpisuje się w aktualne trendy zrównoważonego budownictwa [11,12].

5. LITERATURA

1. PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
2. W. Kurdowski, Chemia cementu i betonu. Polski Cement, PWN, Warszawa 2010.
3. W. Grzmil, Z. Owsiak, Wpływ karbonatyzacji betonu samozagęszczającego się z dodatkiem granulowanego żużla wielkopieczowego na wybrane jego właściwości, Cement Wapno Beton 80, 137-144 (2013).
4. L. Czarnecki, P. H. Emmons, Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Wydawnictwo Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2002.

5. Z. Ściślewski, Ochrona konstrukcji żelbetowych, Warszawa, Arkady 1999.
6. A. Zybura, M. Jaśniok, T. Jaśniok, Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu, PWN, Warszawa 2011.
7. A. Zybura, M. Jaśniok, T. Jaśniok, O trwałości, diagnostyce i obserwacji konstrukcji żelbetowych. „Inżynieria i Budownictwo, 66, 519-525 (2010). Cementu, Kraków, 2010
8. A.M. Neville, Właściwości betonu, 4. wyd., Polski Cement, Kraków
9. E. Possan, W. A. Thomazc, G. A. Aleandric, E. F. Felix, A. C.P. dos Santosa, „CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study, Case Studies in Construction Materials, 2017
10. Christos Tassos, Kosmas K. Sideris, Alexandros Chatzopoulos, Emmanouel Tzanis, Marios S. Katsiotis, „Influence of the Type of Cement on the Durability of Concrete Structures Exposed to Various Carbonation Environments in Greece: A Contribution to the Sustainability of Structures” , Construction Materials, 2023.
11. N Venkat Rao, T Meena, „A review on carbonation study in concrete” , Materials Science and Engineering, 2017
12. E. F. Felix, T. J. Rodrigues Balabuch, M. Corrêa Posterli, E. Possan, R. Carrazedo, „Service life analysis of reinforced concrete structure under uniform corrosion through ANN model coupled to the FEM, Revista ALCONPAT, 2018
13. J. Mądrawski, K. Ziemblińska, R. Juszczak, D. Zawal, J. Olejnik, „Tradycyjne i alternatywne metody oceny intensywności procesu sekwestracji ditlenku węgla przez kruszywo betonowe z recyklingu, Rocznik Ochrona Środowiska, 2013
14. L. Czarnecki, P. Wojciechowski, Metody oceny przebiegu karbonatyzacji betonu, Mat. Bud. 2 (2008) 5–7.
15. G. Wieczorek, Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki lub karbonatyzację otuliny, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2002.
16. PN-EN 206+A1:2016 Beton Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność, 2018.
17. PN-B-06265:2018-10 Beton Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie normy PN-EN 206+A1:2016-12.
18. G. Wieczorek, Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki lub karbonatyzację otuliny, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2002.
19. M. Venuat, J. Alexander, Rev. Mater. Cons., (1968) 421–481.
20. J.P. Balayssac, J. Grandet, H. Detriche, Effects of curing upon carbonation of concrete, Constr. Build. Mater. 9 (2) (1994) 91–95.
21. G.J. Verbeck, Carbonation of hydrated portland cement, (1958) 17–36.
22. P. Wojciechowski, Model karbonatyzacji betonu, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013.
23. J.M. Chi, R. Huang, C.C. Yang, Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method, J. Mar. Sci. Technol. 10 (2002) 14–20.
24. T. Saeki, Effect of carbonation on chloride penetration in concrete, Third RILEM Work. Test. Model. Chloride Ingress into Concr., Madrid, Spain, 2002.
25. S. Hussain, D. Bhunia, S.B. Singh, Assessment of carbonation depth under natural and accelerated carbonation conditions, Indian Concr. J. 90 (2016) 57–64.
26. P. Schiessl, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 255, 39, 1976.
27. P. Łapiński, Trwałość konstrukcji żelbetowych, Stowarzyszenie Producentów Elementów Betonowych dla Kanalizacji, 2011.

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.

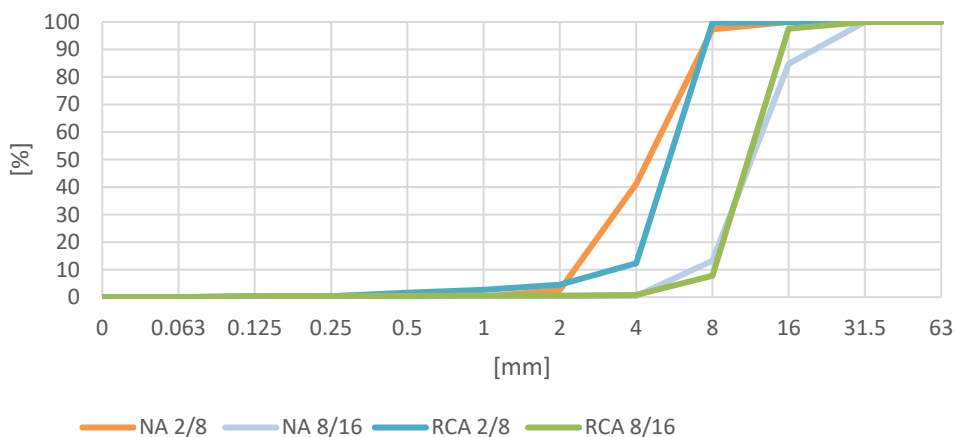
3.7. Global Warming Potential

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

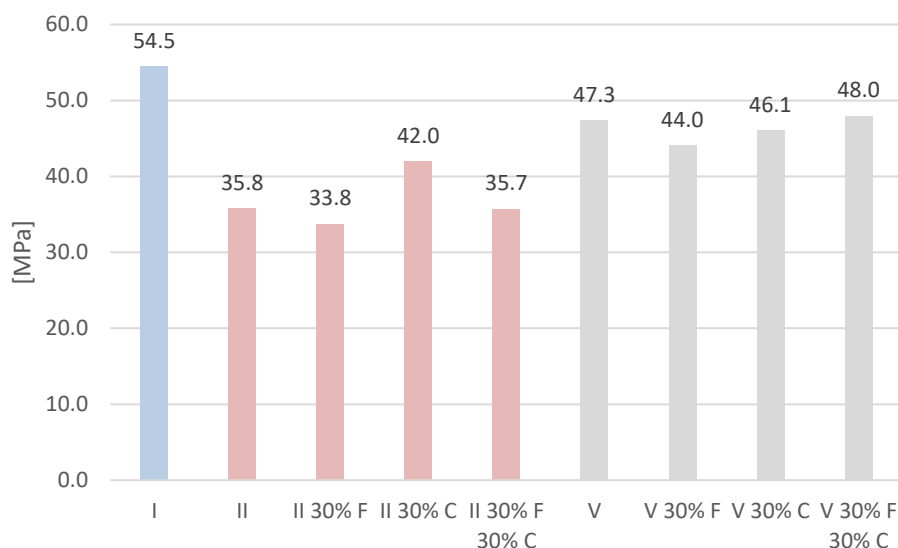
I, II i V – rodzaj użytego cementu

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.

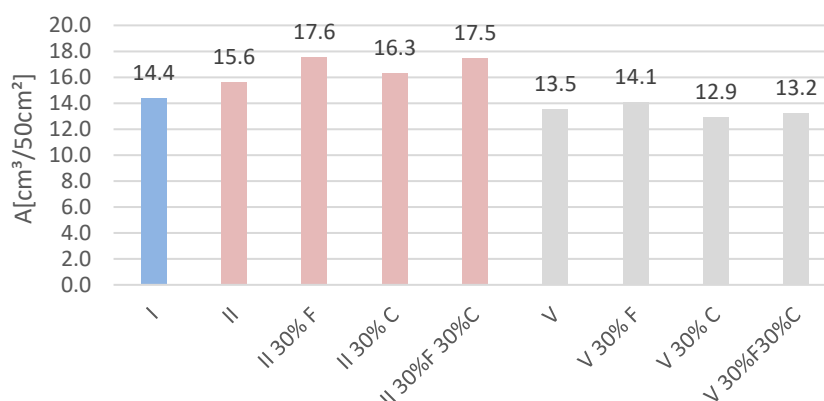
Nazwa	Wytrzymałość próbek testowanych [MPa]	Wytrzymałość próbek referencyjnych [MPa]	Spadek wytrzymałości [%]	Utrata masy [%]
I	44,8	51,3	13	0,09
II	22,4	36,4	39	-0,50
II 30% F	37,8	37,4	0	-0,11
II 30% C	30,7	45,3	32	-0,39
II 30% F 30% C	29,2	40,5	28	0,16
V	43,0	47,0	9	-0,19
V 30% F	42,5	48,8	13	-0,07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

1. Wstęp

Mówiąc o trwałości elementów wykonanych z betonu mamy na myśli ich odporność na działanie czynników korozyjnych, która pozwala na ich bezpieczną eksploatację w założonym okresie użytkowania.

Drogowe obiekty inżynierskie są budowlami o planowanym długim okresie użytkowania przekraczającym niejednokrotnie 50 lat.

W odniesieniu do konstrukcji żelbetowych i sprężonych w okresie eksploatacji mogą wystąpić następujące mechanizmy destrukcji:

- korozja zbrojenia w wyniku karbonatyzacji warstwy ochronnej (otuliny)
- korozja zbrojenia zainicjowana przez chlorki wnikające w beton
- zniszczenie spowodowane działaniem mrozu – cykliczne zamrażanie i rozmrażanie.

Zatem zgodnie z normą PN-EN 206 [1], beton przeznaczony na tego typu konstrukcje powinien spełniać wymagania klas ekspozycji XC4, XD3 i XF4.

Z zapisów w Tablicy F.2 z normy PN-B-06265 [2] wynika, że oprócz cementu CEM I do w/w klas ekspozycji, można zastosować bez potwierdzania przydatności cementy CEM II/A-S, A-V, A-LL, A-M(S-V), (S-LL) i (V-LL); cementy CEM II/B-S, B-V, B-M(S-V) oraz cement hutniczy CEM III/A 42,5.

W Warunkach Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych - WWiORB M-13.01.00 v05 z roku 2025 [8] do betonów konstrukcyjnych dopuszczone są wszystkie wymienione powyżej cementy z tabeli F.2 [2]. Natomiast do betonów sprężonych bez żadnych zastrzeżeń dopuszczone są spośród wymienionych tylko cementy CEM I i CEM II/A. Co do cementów CEM II/B i CEM III/A, to zgodnie z zapisami tego dokumentu [8] za zgodą Inżyniera/ Inspektora Nadzoru możliwe jest również ich zastosowanie do betonów sprężonych pod warunkiem udokumentowania przez Wykonawcę wcześniejszych, krajowych pozytywnych zastosowań.

Dotychczasowa praktyka budowy obiektów inżynierskich z betonu sprężonego odnosząca się do ustrojów nośnych, można powiedzieć że jest oparta wyłącznie o cementy CEM I. Jednakże bazując na dostępnych wynikach badań betonów stosowanych zwłaszcza do prefabrykowanych elementów żelbetowych można stwierdzić, że jest potencjał uzyskania pozytywnych wyników również z zastosowaniem cementów CEM II/A, CEM II/B a nawet CEM III/A.

2. Część badawcza - Założenia

W projekcie przewidziano wykonanie betonów klasy C45/55 XC4/XD3/XF4 z wykorzystaniem cementów CEM II/A i CEM II/B w klasach wytrzymałości 52,5 R oraz 42,5 R a także cementów CEM III/A w klasie wytrzymałości 42,5 R i 42,5 N. Jako referencję wybrano cement CEM I 52,5 R-NA.

Wszystkie betony zaprojektowano z jednakową zawartością cementu wynoszącą 440 kg/m³. Założono klasę konsystencji S5 - najczęściej stosowaną przez producentów prefabrykowanych elementów z betonu sprężonego. Założono, że zawartość powietrza w mieszance badana metodą ciśnieniową powinna wynosić 5,5% (+/-0,5%).

Z uwagi na zróżnicowanie klas wytrzymałości cementu założono, że betony z cementami klasy 42,5 będą miały niższy stosunek w/c.

2.1 Materiały

2.1.1. Materiały - Cement

Wybrano do sprawdzenia dwa cementy typu CEM II/A.

- CEM II/A-V 52,5 R - NA
- CEM II/A-LL 42,5 R – NA

Trzy cementy typu CEM II/B

- CEM II/B-S 52,5 R
- CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA
- CEM II/B-M (S-V) 42,5 R

Dwa cementy typu CEM III/A

- CEM III/A 42,5 R-NA
- CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA

Jako cement referencyjny wybrano stosowany powszechnie w praktyce budowlanej cement CEM I 52,5 R-NA

Właściwości cementów użytych do zarobów laboratoryjnych przedstawiono w Tablicy 1

Tablica 1. Właściwości fizyko-chemiczne cementów.

Właściwości		CEM I 52,5 R- NA	CEM II/ A-V 52,5 R - NA	CEM II/ B-S 52,5 R	CEM II/ A-LL 42,5 R-NA	CEM II/ B-V 42,5 R- HSR/NA	CEM II/ B-M(S-V) 42,5 R	CEM III/ A 42,5 R- NA	CEM III/A 42,5 N- LH/HSR/ NA
Zawartość SO ₃	%	2,80	2,90	3,48	2,74	2,78	2,83	2,80	2,10
Zawartość Cl	%	0,07	0,06	0,07	0,05	0,05	0,06	0,08	0,09
Zawartość Na ₂ O _{eq}	%	0,54	0,68	0,87	0,5	0,85	0,82	0,84	0,94
Powierzchnia właściwa wg Blaina	cm ² /g	5110	5520	5140	5580	5090	4970	4640	4720
Wodozadržność	%	29,0	33,5	30,2	28,4	33,0	34,8	30,5	30,8
Początek wiązania	min	90	135	120	170	190	270	180	180
Koniec wiązania	min	120	165	200	220	215	300	280	230
Wytrzymałość na ściskanie	D2	MPa	33	37	32	27	26	25	22
	D28	MPa	64	66	62	57	55	56	57

2.1.2. Materiały - Domieszki

Na potrzeby niniejszej pracy, do betonów ze wszystkimi cementami zastosowano jeden zestaw domieszek, aby jedyną zmienną w recepturach był rodzaj cementu. Wybrano zestaw domieszek produkcji CEMEX Admixtures składający się z superplastyfikatora ISOCASST 9200 na bazie modyfikowanych eterów polikarboksylowych oraz domieszki napowietrzającej ISOSPHERE 60 opartej na bazie syntetycznych surfaktantów.

2.1.3. Materiały - Kruszywo

Do każdej mieszanki z użyciem różnych rodzajów cementów zastosowano stały układ stosu okruczowego kruszywa składający się z:

- Piasek naturalny 0-2 – 39,6%
- Grys granitowy 2-8 – 21,0%
- Grys granitowy 8-16 – 39,3%



Rysunek 1. Krzywa przesiewu mieszanki kruszyw.

2.2. Receptury i wymagania dla mieszanki betonowej i stwardniałego betonu

Zestaw receptur zaprojektowanych jak dla klasy C45/55 XC4/XD3/XF4 przedstawiono w Tablicy 2

Tablica 2. Receptury mieszanek zaprojektowanych do wykonania w laboratorium.

Kod receptury	Rodzaj cementu	Ilość cementu [kg/m ³]	Woda całk. [kg/m ³]	W/C	Domieszki [% m.c.]	
					ISOCAST 9200	ISOSPHERE 60
CI5R	CEM I 52,5 R-NA	440	165	0,348	Dobierane	Dobierane
II/AV5R	CEM II/A-V 52,5 R-NA	440	165	0,375	Dobierane	Dobierane
II/BS5R	CEM II/B-S 52,5 R	440	165	0,375	Dobierane	Dobierane
II/ALL4R	CEM II/A-LL 42,5 R-NA	440	153	0,348	Dobierane	Dobierane
II/BV4R	CEM II/B-V 42,5 R - HSR/NA	440	153	0,348	Dobierane	Dobierane
II/BM4R	CEM II/B-M (S-V) 42,5 R	440	153	0,348	Dobierane	Dobierane
III/A4R	CEM III/A 42,5 R-NA	440	153	0,348	Dobierane	Dobierane
III/A4N	CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	440	153	0,348	Dobierane	Dobierane

Mieszanki betonowe i betony wykonane według w/w receptur mają spełnić następujące wymagania:

– Mieszanka betonowa

- konsystencja – opad stożka 220-240mm
- zawartość powietrza – metodą ciśnieniową 5,5% (+/-0,5)

Poziom dozowania domieszek ustalany dla każdej receptury do uzyskania wymaganych parametrów mieszanki

– Stwardniały beton

- Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm1} \geq 0,7f_{ck}$, $f_{cm28} \geq f_{ck}+4\text{MPa}$.
- Penetracja wody pod ciśnieniem – max 40mm – zgodnie z [8]
- Mrozoodporność F200 - Jako sprawdzenie dodatkowe wykonano pomiar charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie zgodnie z normą PN-EN 480-11.

Dla oceny i porównania właściwości trwałościowych poszczególnych betonów przewidziano badania:

- odporności na karbonatyzację – zgodnie z normą PN-EN 12390-12.

- odporności na korozję chlorkową – zgodnie z normą PN-EN 12390-18.

3. Część badawcza – wyniki

3.1. Właściwości mieszanek betonowych

Właściwości mieszanek betonowych z poszczególnymi cementami przedstawiono w Tablicy 3.

Oprócz konsystencji mierzonej wartością opadu stożka oraz zawartości powietrza metodą ciśnieniową zbadano również wartość średnicy swobodnego rozplywu stożka. Do uzyskania założonych parametrów zastosowano odpowiednie dozy domieszek.

Tablica 3 Parametry mieszanek betonowych i dozy domieszek

Kod receptury	Konsystencja opad stożka [mm]	Konsystencja swobodny rozplyw stożka [mm]	Zawartość powietrza [%]	Domieszki [% m.c.]	
				ISOCAST 9200	ISOSPHERE 60
CI5R	220	370	5,6	0,45	0,10
II/AV5R	240	400	6,0	0,55	0,30
II/BS5R	230	420	5,6	0,78	0,35
II/ALL4R	220	360	5,9	0,61	0,44
II/BV4R	220	370	6,0	1,20	0,85
II/BM4R	220	320	5,4	0,65	0,63
III/A4R	240	570	5,8	0,98	0,38
III/A4N	230	400	5,9	0,49	0,34

Wszystkie mieszanki uzyskały założoną ciekłość – konsystencja mierzona opadem stożka na poziomie S5 (220-240mm). Zawartość powietrza sprawdzona metoda ciśnieniową dla wszystkich mieszanek mieści się w założonym zakresie 5,5% (+/- 0,5%)

3.2. Właściwości fizyko-mechaniczne stwardniałego betonu

Tablica 4 zawiera zestawienie wyników badania wytrzymałości na ściskanie po 1, 2 i 28 dniach dojrzewania w warunkach normowych zgodnie z PN-EN 12390-3. W Tablicy 4 umieszczono również wyniki badania penetracji wody pod ciśnieniem wg normy PN-EN 12390-8.

Tablica 4 Wytrzymałości na ściskanie i penetracja wody pod ciśnieniem

Kod receptury	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			Maksymalna penetracja wody [mm]
	f_{cm1}	f_{cm2}	f_{cm28}	
CI5R	40,6	45,1	62,4	20
II/AV5R	38,6	49,7	74,1	10
II/BS5R	35,7	43,4	59,5	10
II/ALL4R	40,1	49,9	71,1	15
II/BV4R	32,6	43,4	79,2	15
II/BM4R	31,4	40,0	75,8	20
III/A4R	31,4	42,5	75,4	10
III/A4N	18,6	25,5	66,8	15

Wytrzymałość wczesna betonów f_{cm1} jak i f_{cm2} koreluje z wytrzymałością wczesną cementów.

Zakładając, że do sprężenia betonu potrzebna jest wytrzymałość na poziomie $0,7f_{ck}$ czyli 38,5 MPa, to odpowiednie wytrzymałości po 1 dniu zostały uzyskane tylko przez 3 betony – CI5R, II/AV5R i II/ALL4R. Po 2 dniach - przez kolejne 4 betony II/BS5R, II/BV4R, II/BM4R i III/A4R, natomiast beton III/A4N zgodnie z przewidywaniami musi dojrzewać dłużej niż 2 dni dla uzyskania wytrzymałości odpowiedniej do sprężenia.

Wszystkie betony uzyskały wytrzymałość f_{cm28} spełniającą warunki dla klasy betonu C45/55

Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem wskazuje na bardzo dobrą szczelność wszystkich betonów. Wszystkie wartości sytuują się znacznie poniżej 40 mm, co jest wartością graniczną dla betonów przeznaczonych dla tej klasy betonów [8].

W Tablicy 5 umieszczono wyniki odporności na zamrażanie i rozmrażanie uzupełnione o charakterystykę rozkładu porów w stwardniałym betonie.

Tablica 5. Wyniki badania struktury napowietrzenia i mrozoodporności F200

Kod receptury	Struktura napowietrzenia betonów według PN-EN 480-11		Mrozoodporność F200 według PN-B 06265	
	A300 [%]	L [mm]	Spadek wytrzymałości Δf_{cm}	Ubytek masy Δm
CI5R	2,09	0,202	< 20%	< 5%
II/AV5R	2,44	0,170		
II/BS5R	2,44	0,198		
II/ALL4R	2,54	0,159		
II/BV4R	2,90	0,152		
II/BM4R	2,39	0,206		
III/A4R	2,67	0,181		
III/A4N	3,16	0,179		

Zawartość mikroporów A300um dla wszystkich betonów sytuuje się powyżej 2%, natomiast maksymalny wskaźnik rozmieszczenia porów L dla 2 betonów nieco przekracza wartości 0,200 mm, dla pozostałych zaś jest poniżej 0,200 mm. Wyniki te wskazują na właściwą charakterystykę porów powietrznych, co zostało potwierdzone przez pozytywne wyniki badania mrozoodporności F200 dla wszystkich badanych betonów.

Mając na uwadze powyższe wyniki można stwierdzić, że właściwości fizyko-mechaniczne betonów ze wszystkimi cementami spełniają wymagania dla betonów konstrukcyjnych.

Jedynie wytrzymałości wczesne potrzebne do sprężenia betonu są osiągane w różnym tempie - stosownie do dynamiki narastania wytrzymałości cementów.

3.3. Odporność na korozję zbrojenia wywołaną karbonatyzacją

Zgodnie z zapisami normy PN-EN 12390-12 – punkt 7 UWAGA 1: „Przy normalnych składach betonu głębokość karbonatyzacji po 70 dniach szacunkowo powinna wynosić ≥ 4 mm. Wartość niższa niż ta wskazuje na **beton o wysokiej odporności na karbonatyzację**, ale w przypadku bardzo małych głębokości karbonatyzacji szacunki dokładności podane w rozdziale 10 nie mają zastosowania do określenia szybkości karbonatyzacji [6].

Przedstawione w Tablicy 6 wyniki głębokości karbonatyzacji wskazują, że betony z cementami CEM II/A mieszczą się w zakresie poniżej 4mm podobnie jak beton z cementem CEM I. Również betony z cementami CEM II/B-S 52,5 R i CEM II/B-M(S-V) 52,5 R wykazują wysoką odporność na karbonatyzację

Tablica 6 Wyniki badań głębokości karbonatyzacji wg PN-EN 12390-12.

Kod receptury	Średnia wartość pomiarów głębokości karbonatyzacji dk [mm]				Stała szybkości karbonatyzacji K_{AC} [mm/√dni]	Stała „a”	Współczynnik determinacji
	po czasie t [dni]						
	0	7	28	70		[mm]	R²
CI5R	0	0	0,3	0,6	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm		
II/AV5R	0	0,2	0,6	2,3	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm		
II/BS5R	0	0,4	0,6	1,4	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm		
II/ALL4R	0	0	0,3	0,6	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm		
II/BV4R	0	1,2	4,8	6,1	1,21	0,42	0,95
II/BM4R	0	0,2	0,7	1,9	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm		
III/A4R	0	0,4	2,3	4,3	1,77	0,98	0,95
III/A4N	0	0,8	3,8	5,0	1,46	0,56	0,95

Betony z cementem CEM II/B-V42,5 R-HSR/NA i cementami hutniczymi CEM III/A 42,5 R-NA, CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA po 70 dniach wykazują głębokość karbonatyzacji od 4,3 do 6,1mm, czyli niewiele, ale przekraczającą poziom 4mm, zatem nie można ich zaliczyć do tej samej grupy odporności na karbonatyzację co pozostałe 5 betonów.

3.4. Odporność na korozję zbrojenia zainicjowana przez chlorki

Metoda pomiaru współczynnika migracji jonów chlorkowych zawarta w normie PN-EN 12390-18 uważana jest za porównywalną z metodą NT Build 492 stosowaną od wielu lat.

W literaturze [9] powoływane są 4 poziomy odporności na wnikanie chlorków uzależnione od wartości współczynnika D_{nss} – podane w Tablicy 7.

Tablica 7. Ocena odporności betonu na wnikanie chlorków [9]

Współczynnik migracji jonów chlorkowych D_{nss}	Odporność na wnikanie chlorków
$< 2 \times 10^{-12} m^2/s$	Bardzo dobra
$2 - 8 \times 10^{-12} m^2/s$	Dobra
$8 - 16 \times 10^{-12} m^2/s$	Dopuszczalna
$> 16 \times 10^{-12} m^2/s$	Niedopuszczalna

Wyniki pomiaru współczynnika migracji chlorków uzyskane dla badanych betonów przedstawiono w Tablicy 8. Uzyskane wartości wskazują, że betony z cementami CEM III oraz z cementami CEM II/B mieszczą się w zakresie poniżej $2 \times 10^{-12} m^2/s$ – wykazują zatem bardzo

dobrą odporność na migracje chlorków. Betony z użytymi do projektu cementami CEM II/A oraz CEM I odznaczają się dobrą odpornością na wnikanie chlorków

Tablica 8 – Wyniki badania odporności betonów na migracje chlorków wg PN-EN 12390-18

Kod receptury	Średnia wartość penetracji	Współczynnik migracji chlorków	Ocena odporności na wnikanie chlorków
	X_d [mm]	D_{nssm} [$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$]	[-]
CI5R	9,5	4,035	Dobra
II/AV5R	10,6	2,255	Dobra
II/BS5R	6,5	1,323	Bardzo dobra
II/ALL4R	9,2	3,896	Dobra
II/BV4R	7,5	1,548	Bardzo dobra
II/BM4R	7,6	1,581	Bardzo dobra
III/A4R	12,6	1,358	Bardzo dobra
III/A4N	5,3	0,529	Bardzo dobra

4. Obliczenie śladu węglowego dla sprawdzanych rozwiązań

Ślad węglowy stał się jednym z parametrów uwzględnianych przez odbiorców w ocenie składanych ofert i zaczyna mieć wpływ na wybór konkretnego dostawcy. Biorąc pod uwagę przedmiot na którym skupiał się niniejszy referat stosownym wydaje się porównanie śladu węglowego generowanego przez poszczególne rozwiązania. Skupiono się wyłącznie na różnicach wynikających z rodzaju zastosowanego cementu, ponieważ pozostałe surowce były identyczne dla wszystkich rozwiązań. Dane dla cementów zostały przyjęte w oparciu o Deklaracje Środowiskowe III Typu z roku 2023 umieszczone na stronie producenta – CEMEX Polska sp. z o.o. [11]. W Tablicy 9 przedstawiono wartości (kg/m^3) i różnice procentowe wielkości śladu węglowego jako $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Dla dwu cementów nie zostały opracowane EPD, stąd brak stosownych wartości w zestawieniu

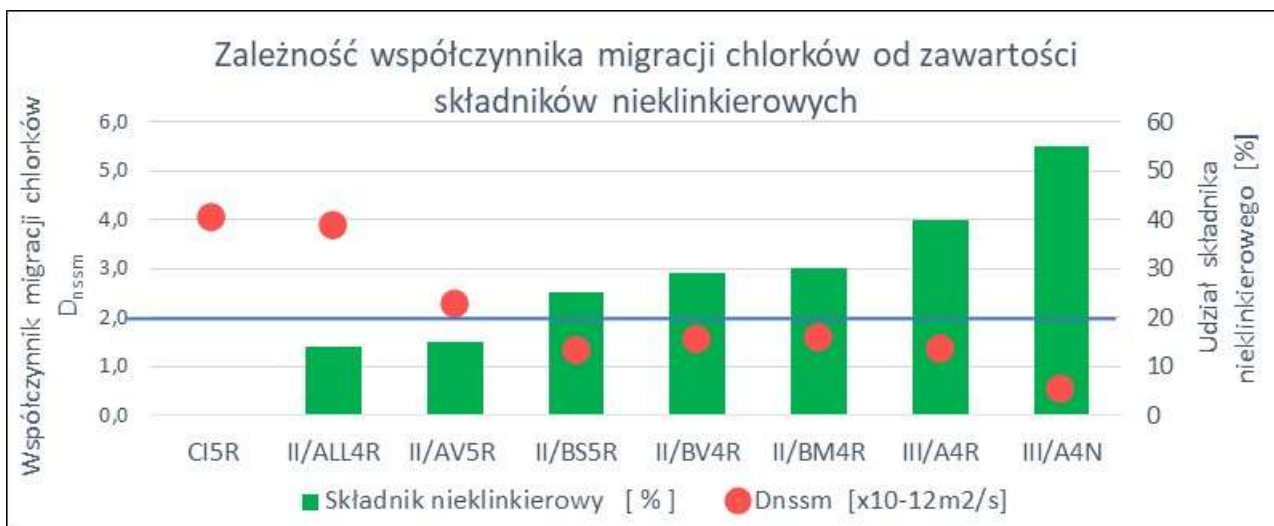
Tablica 9 Porównanie śladu węglowego z cementu w sprawdzanych rozwiązaniach

Cement	Jednostkowy ślad węglowy [$\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kg}$ cementu]	Udział cementu, [kg/m^3]	Ślad węglowy z Cementu, [$\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^3$ betonu]	Ślad węglowy Cement [%]
CEM I 52,5 R-NA	0,482	440	212,1	100%
CEM II/A-V 52,5R-NA	0,449	440	197,6	93% (-7%)
CEM II/A-LL 42,5R-NA	0,447	440	196,7	93% (-7%)
CEM II/B-S 52,5 R	-	440	-	-
CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA	0,376	440	165,4	78% (-22%)
CEM II/B-M(S-V) 42,5 R	0,381	440	167,6	79% (-21%)
CEM III/A 42,5 R-NA	-	440	-	-
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	0,231	440	101,6	48% (-52%)

5. Podsumowanie i wnioski

5.1. Podsumowanie wyników badań przeprowadzonych w ramach projektu:

1. Uzyskano założone parametry mieszanek betonowych, jakkolwiek ilości zastosowanych domieszek były zróżnicowane dla każdego z użytych cementów. Betony z cementami innymi niż CEM I wymagały znacznie większych dawek domieszki napowietrzającej w stosunku do referencji.
2. Potrzebną do sprężenia wytrzymałość 38,5 MPa ($0,7f_{ck}$) po 1 dniu uzyskano tylko dla cementów CEM I, CEM II/A-V 52,5R-NA oraz CEM II/A-LL 42,5R-NA. Beton z Cementem CEM II/B-S 52,5 R uzyskał wytrzymałość 35,7 MPa, zatem warunek $0,7f_{ck}$ nie został spełniony po jednym dniu a dopiero po 2 dniach. Betony z cementami klasy 42,5R potrzebną wytrzymałość uzyskiwały również dopiero po 48 godzinach pomimo obniżenia wskaźnika w/c w stosunku do cementów klasy 52,5R. Beton z cementem hutniczym CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA – zgodnie z przewidywaniami – nawet po 48 godzinach nie uzyskał wytrzymałości potrzebnej do sprężenia.
3. Wszystkie betony charakteryzują się bardzo dobrą szczelnością. Maksymalna głębokość penetracji wody pod ciśnieniem w żadnym przypadku nie przekracza 20mm.
4. Wszystkie betony wykazują odporność na zamrażanie i rozmrażanie, na co wskazują: bezpośrednio wynik badania mrozoodporności F200, a pośrednio uzyskane wartości charakteryzujące rozkład porów powietrznych w stwardniałym betonie.
5. Odporność betonów na karbonatyzację
 - a. Wysoką odporność na karbonatyzację – głębokość karbonatyzacji po 70 dniach poniżej 4 mm [6] - wykazują betony z cementami CEM II/A, podobnie jak beton z cementem CEM I.
 - b. Również betony z cementami CEM II/B-S 52,5 R i CEM II/B-M(S-V) 42,5 R wykazują wysoką odporność na karbonatyzację.
 - c. Pozostałe betony - z cementem CEM II/B-V42,5 R-HSR/NA i cementami hutniczymi CEM III/A po 70 dniach wykazują głębokość karbonatyzacji od 4,3 do 6,1mm, czyli niewiele, ale jednak przekraczającą poziom 4 mm.
6. Odporność betonów na korozję chlorkową – mierzona współczynnikiem migracji chlorków
 - a. Betony z użyciem cementów hutniczych CEM III/A oraz CEM II/B charakteryzują się najniższymi wartościami współczynnika D_{nssm} zatem wykazują **bardzo dobrą odporność na wnikanie chlorków**[8],
 - b. Pozostałe betony - z CEM I i CEM II/A mają wskaźnik odporności na poziomie max $4,035 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, zatem mieszczą się dolnej części przedziału (od 2 do $8 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) ustalonego dla **dobrej odporności** na wnikanie chlorków [9].
 - c. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem zawartości nieklinkierowych składników cementu wartość współczynnika D_{nssm} dla betonu maleje, zatem jego odporność na wnikanie chlorków rośnie - zwłaszcza kiedy nieklinkierowymi składnikami są popiół V oraz żużel S Rysunek 2.



Rysunek 2 Zależność współczynnika migracji chlorków od udziału składników nieklinkierowych

5.2. Wnioski

Traktując trwałość betonu jako odporność na korozyjne oddziaływania środowiska, betony konstrukcyjne drogowego obiektu inżynierskiego muszą być odporne łącznie na 3 rodzaje korozji: mrozową, chlorkową oraz wywołaną karbonatyzacją.

Zabezpieczenie przed korozją mrozową – uzyskanie klasy XF4 – uzyskuje się przez odpowiednie napowietrzenie betonu, czyli dobór efektywnego zestawu domieszek, który umożliwia uzyskanie odpowiedniej charakterystyki rozkładu porów powietrznych.

Przeprowadzone testy wykazały, że mrozo odporne betony uzyskano dla wszystkich rodzajów cementu, jednak dla mieszanek z cementami zawierającymi składniki nieklinkierowe - zwłaszcza popiół lotny krzemionkowy- dozowanie domieszek, a szczególnie napowietrzacza musiało zostać znacznie zwiększone.

W świetle uzyskanych wyników badania odporności na wnikanie chlorków można stwierdzić, że każde obniżenie zawartości klinkieru w cemencie zastosowanym do betonu powoduje poprawę tej odporności w stosunku do betonu z cementem CEM I. Biorąc pod uwagę tę tendencję dla zabezpieczenia przed korozją chlorkową nie ma przeciwwskazań, a nawet wskazane jest stosowanie cementów obniżonej zawartości klinkieru w tym również cementów CEM III/A.

Sytuacja wygląda nieco inaczej jeśli chodzi o odporność na karbonatyzację. Tutaj pomimo bardzo wysokiej szczelności wszystkich betonów - mierzonej odpornością na penetrację wody pod ciśnieniem[8] - głębokość karbonatyzacji betonów z cementami CEM III/A i CEM II/B-V jest większa niż w przypadku cementu CEM I. Za to wszystkie betony z cementami CEM II/A mieszczą się w przedziale głębokości karbonatyzacji poniżej 4 mm podobnie jak beton z cementem CEM I, co zgodnie z zapisem normy PN-EN 12390-12 – punkt 7 UWAGA 1: „Przy normalnych składach betonu głębokość karbonatyzacji po 70 dniach szacunkowo powinna wynosić ≥ 4 mm. Wartość niższa niż ta wskazuje na **beton o wysokiej odporności na karbonatyzację** [6].

Potwierdza to słuszność dopuszczenia cementów CEM II/A do betonów sprężonych w Warunkach Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych - WWiORB M-13.01.00 v05 [8].

Dodatkowo betony z projektu do których zastosowano cementy z grupy CEM II/B: CEM II/B-S 52,5 R i CEM II/B-M(S-V) 42,5 R również wykazują wysoką odporność na karbonatyzację – skarbonatyzowana warstwa znacznie poniżej 4mm.

Można zatem stwierdzić, że betony o wysokiej szczelności wykonane z:

- CEM II/A-LL – zawierającym kamień wapienny LL w ilości 14%
- CEM II/A-V zawierającym popiół lotny krzemionkowy V w ilości 15%,
- CEM II/B-S zawierającym granulowany żużel wielkopiecowy S w ilości 25%
- CEM II/B-M(S-V) zawierającym popiół (V) i żużel (S) - ilościach po 15%,

wykazują odporność na karbonatyzację porównywalną do odporności betonu o wysokiej szczelności wykonanego z cementem CEM I; a jednocześnie mają większą odporność na wnikanie chlorków, zwłaszcza dla cementów zawierających żużel S i popiół V.

Reasumując - zastosowanie cementów CEM II/A i niektórych cementów CEM II/B wykorzystanych w projekcie do betonów sprężonych w elementach drogowego obiektu inżynierskiego może stanowić alternatywę dla cementów CEM I. Uzyskane wyniki dla sprawdzanych właściwości decydujących o trwałości tych betonów nie są gorsze od właściwości betonu wykonanego z CEM I. Co do cementów hutniczych i cementu CEM II/B-V ewentualna możliwość ich zastosowania wymaga dalszych badań, pozwalających na określenie czy grubości otuliny zbrojenia zalecane w Eurokodzie PN-EN 1992-1-1, zapewnią skuteczną ochronę stali sprężającej w założonym okresie użytkowania. Dostępne obecnie metody badawcze umożliwiają jedynie porównywanie właściwości uzyskiwanych dla nowych rozwiązań z właściwościami rozwiązań stosowanych dotychczas - traktowanymi jako referencyjne.

Literatura:

- [1] PN-EN 206+A2: 2021 Beton Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [2] PN-B 06265:2022-08 Beton Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2
- [3] PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu. Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem
- [4] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [5] PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu - Metody badań - Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [6] PN-EN 12390-12:2020-06 Badania betonu Część 12:Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację. Przyspieszona metoda karbonatyzacji
- [7] Norma PN-EN 12390-18:2021 Badania betonu Część 18:Oznaczanie współczynnika migracji chlorków
- [8] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych M-13.01.00 v05:2025 Beton Konstrukcyjny w Drogowych Obiektach Inżynierskich
- [9] Daria Józwiak-Niedźwiedzka „Wpływ napowietrzenia na współczynnik migracji chlorków w betonach z popiołem fluidalnym” Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczo-rozwojowy nr R04 013 01 MNiSW.
- [10] NT Build 492, Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, 1999.
- [11] Deklaracje środowiskowe www.cemex.pl/deklaracje-srodowiskowe-iii-typu-epd-cement
- [12] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 Projektowanie konstrukcji z betonu Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków

XIII
KONFERENCJA

DNI BETONU 2025

13-15 października 2025



PARTNERZY PROGRAMOWI



SPONSORZY / FIRMY



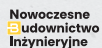
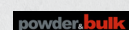
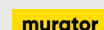
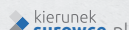
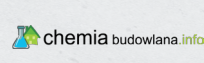
PATRONAT MEDIALNY



www.bta-czasopismo.pl



WSPÓŁPRACA MEDIALNA



ORGANIZATOR



Stowarzyszenie Producentów Cementu

30-003 Kraków • ul. Lubelska 29 • tel.: +48-12-423-33-55

biuro@polskicement.pl • dnibetonu@polskicement.pl

www.polskicement.pl

Bądź z nami w kontakcie:

www.facebook.com/PolskiCement

www.facebook.com/ArchitekturaBetonowa

x.com/polskicement

www.instagram.com/architektura_betonowa



ISBN: 978-83-61331-51-3