

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

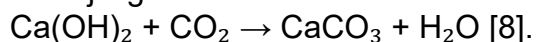
in the reference mixtures comply with the recommended (PN-B-06265:2022-08 table F.2) application areas.

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.

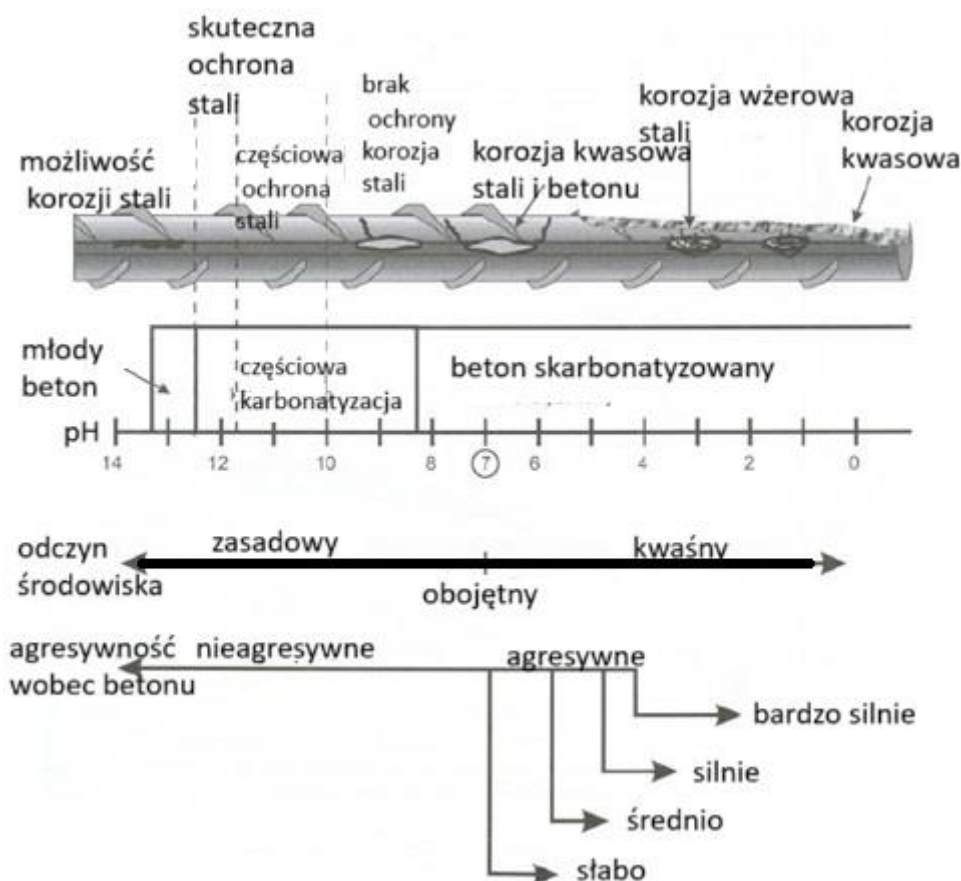
1.1 Mechanizm karbonatyzacji betonu

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.

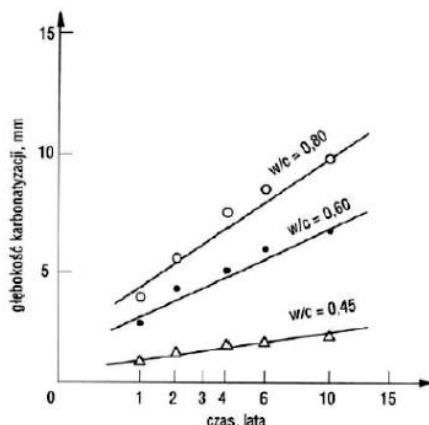
Do najważniejszych zewnętrznych czynników środowiskowych należą:

- 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, grysy 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

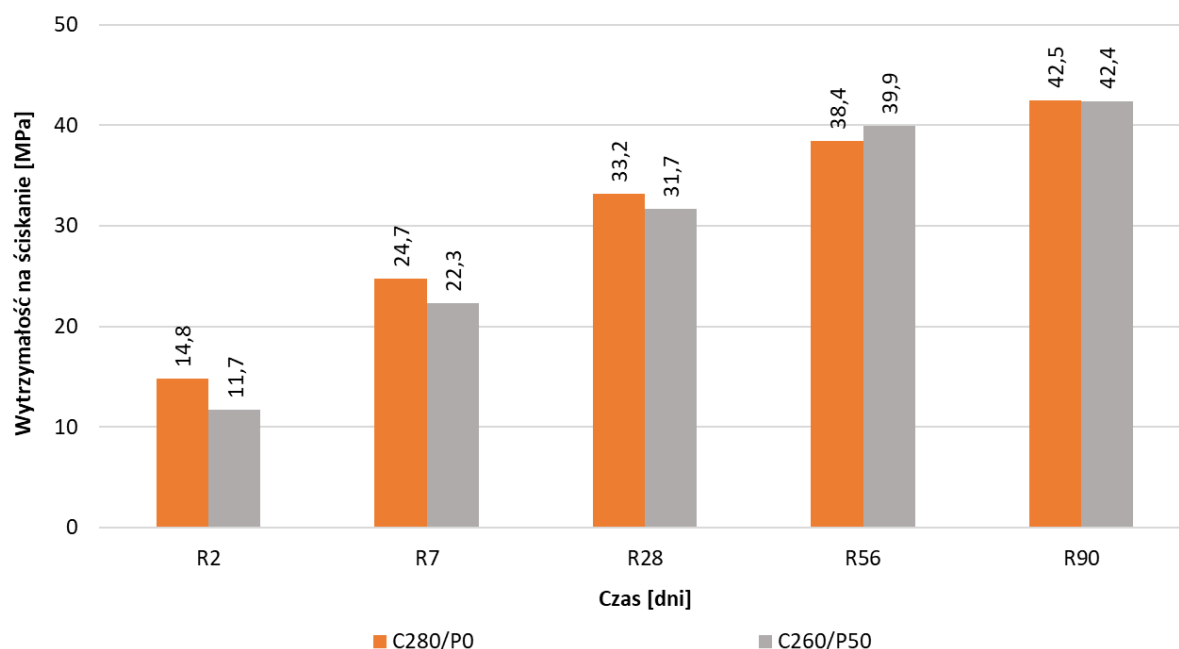
Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie oraz średniej głębokości na karbonatyzację przedstawiono na rysunkach 3-10 oraz w tablicach 3-10 dla poszczególnych rodzajów cementów w klasie ekspozycji XC2 i XC4. Wartości wielkości głębokości karbonatyzacji przedstawiono po 70 dniach wraz ze współczynnikami 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.

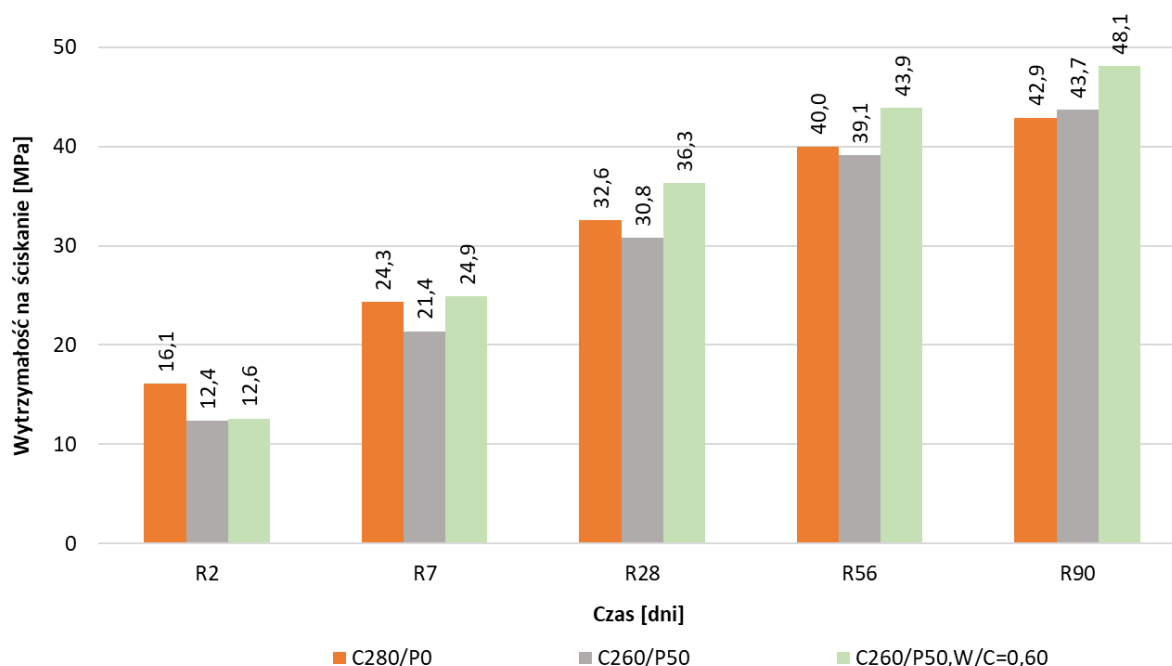
Głębokość karbonatyzacji zależy od składu mieszanki betonowej, na który wpływ ma obecność popiołu lotnego krzemionkowego. Dla betonu C280/P0 głębokość karbonatyzacji wyniosła 17,4 mm przy współczynniku determinacji 0,999, a dla C260/P50 19,0 mm również przy takiej samej wartości współczynnika determinacji.

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).

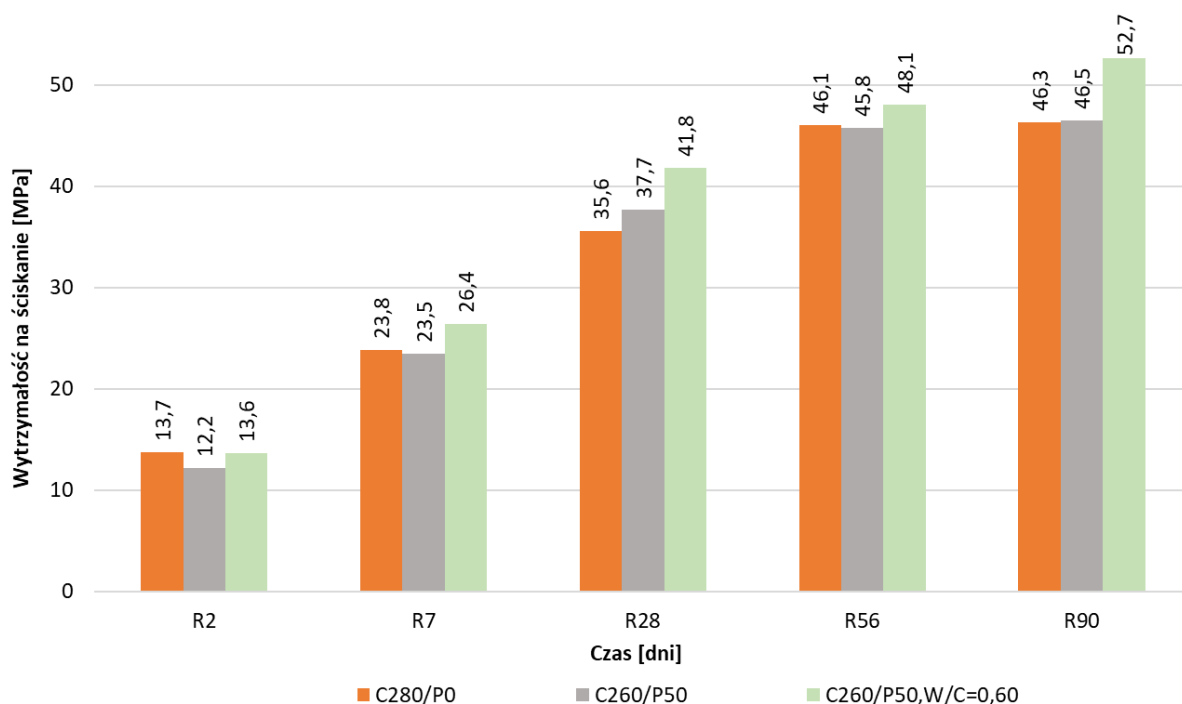
Równolegle przeprowadzono ocenę odporności mieszanek na karbonatyzację. Głębokość penetracji CO₂ po 70 dniach w komorze była większa w przypadku betonu C280/P0 i C260/50 wyniosła odpowiednio 19 mm i 20,9 mm przy współczynnikach determinacji 0,999 oraz 0,995. Obniżenie stosunku W/C sprawia, że wielkość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

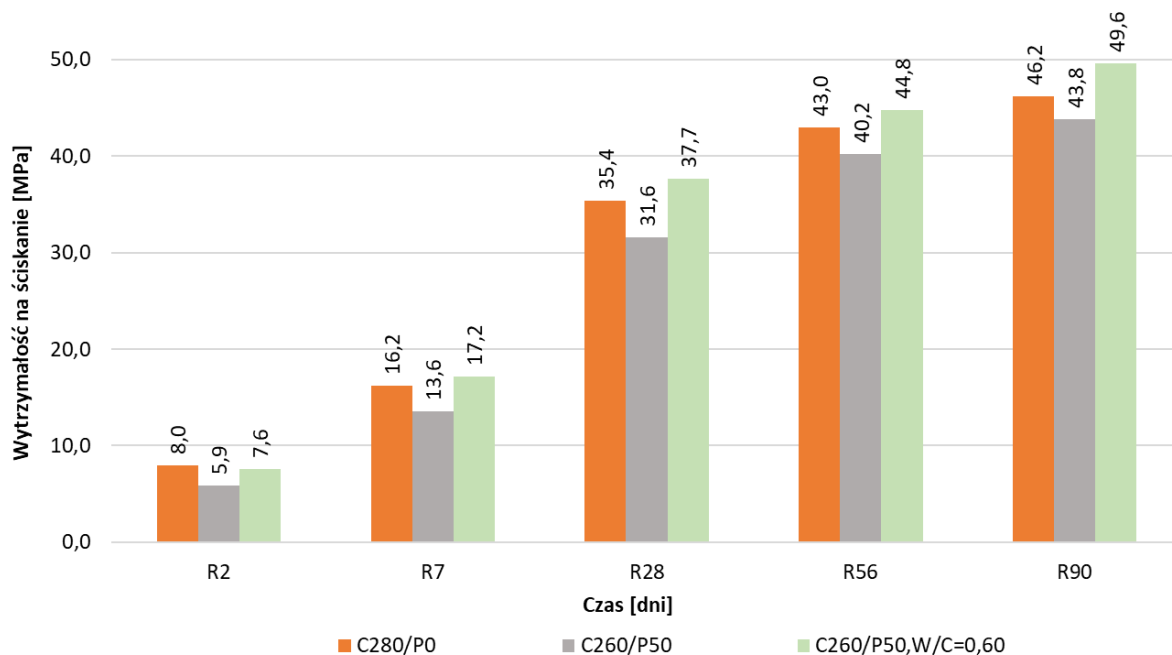
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA klasa ekspozycji XC2

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.

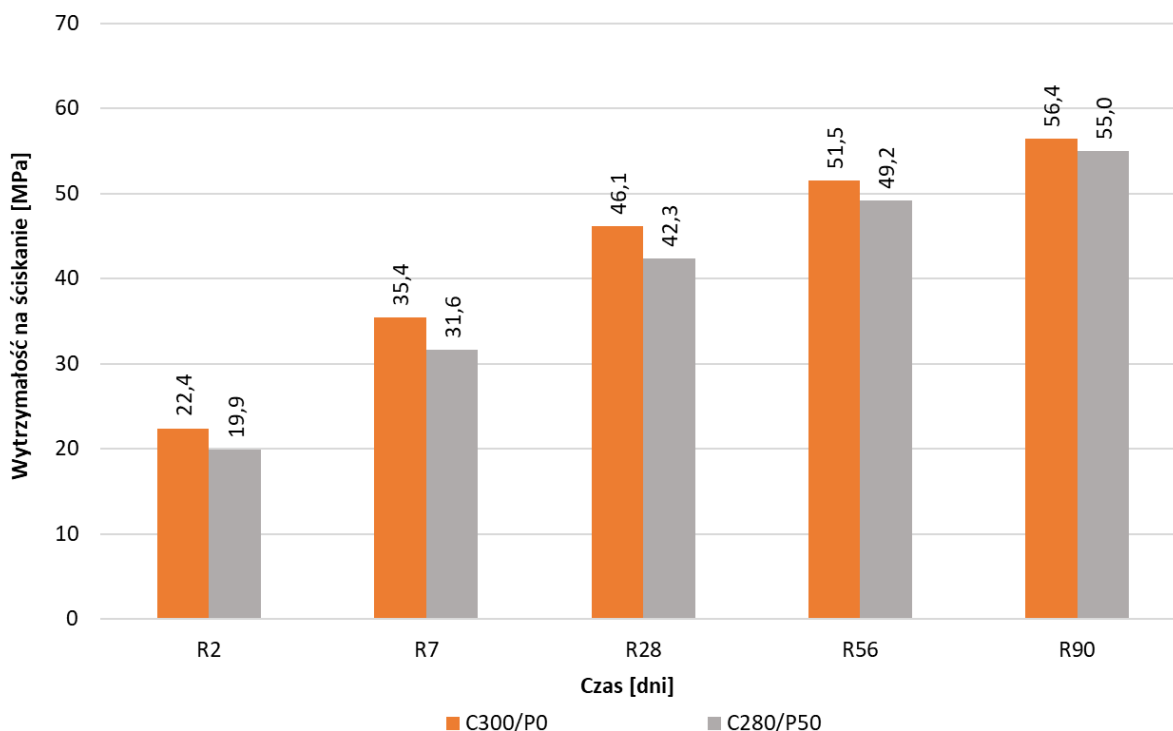
CEM II/A-V 42,5 R-NA klasa ekspozycji XC4

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.

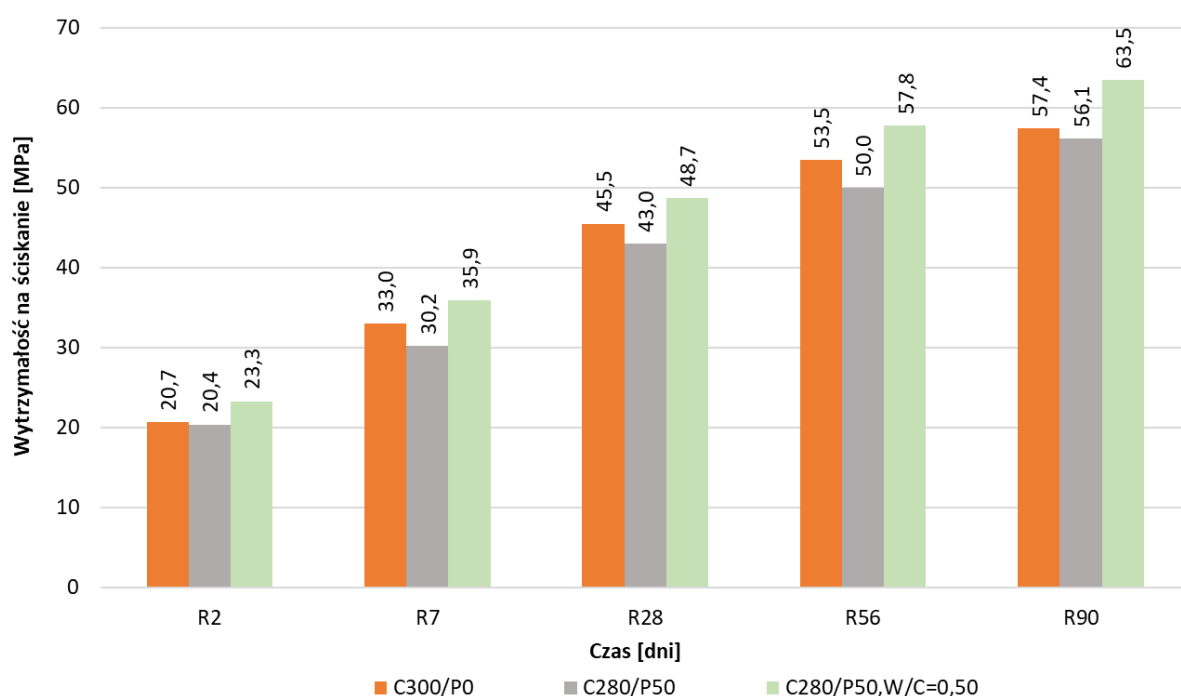
CEM II/B-V 42,5 R klasa ekspozycji XC4

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.

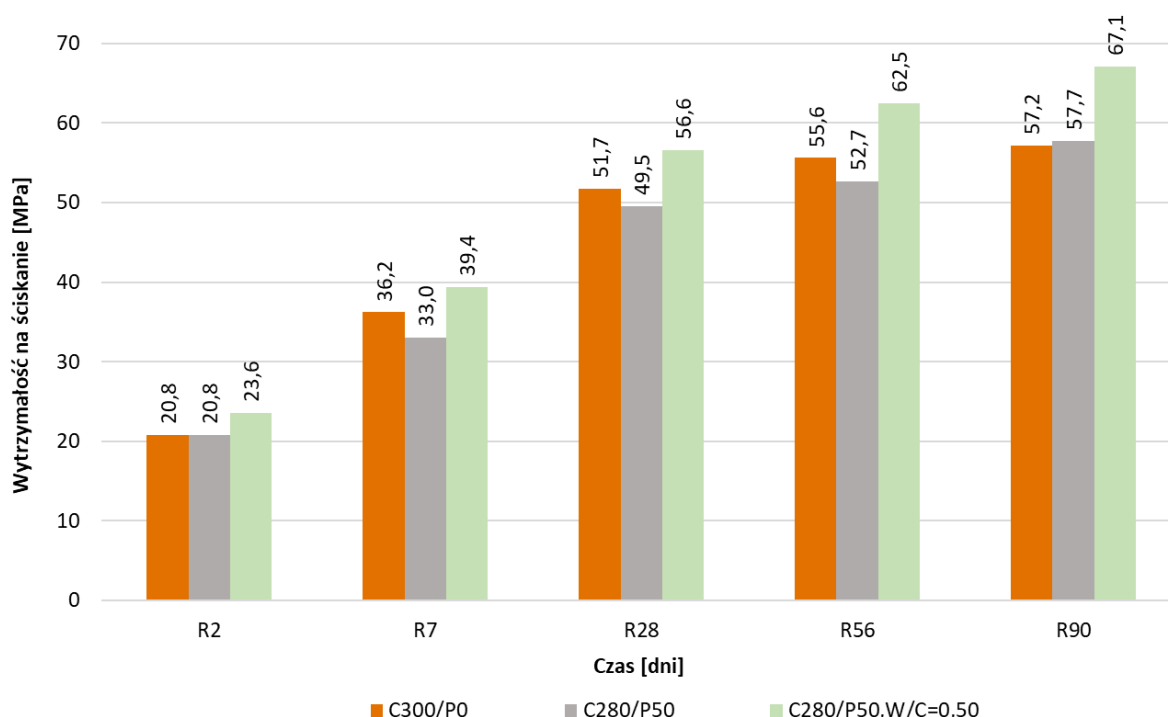
Równolegle przeprowadzono ocenę odporności mieszanek na karbonatyzację. Głębokość penetracji CO₂ była większa w przypadku betonów C280/P50 oraz C300/P0, i wyniosła odpowiednio 16,3 i 13,9 mm przy współczynnikach determinacji 0,996 oraz 0,995, podczas gdy dla betonu C280/P50, W/C=0,50 wartość ta osiągnęła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

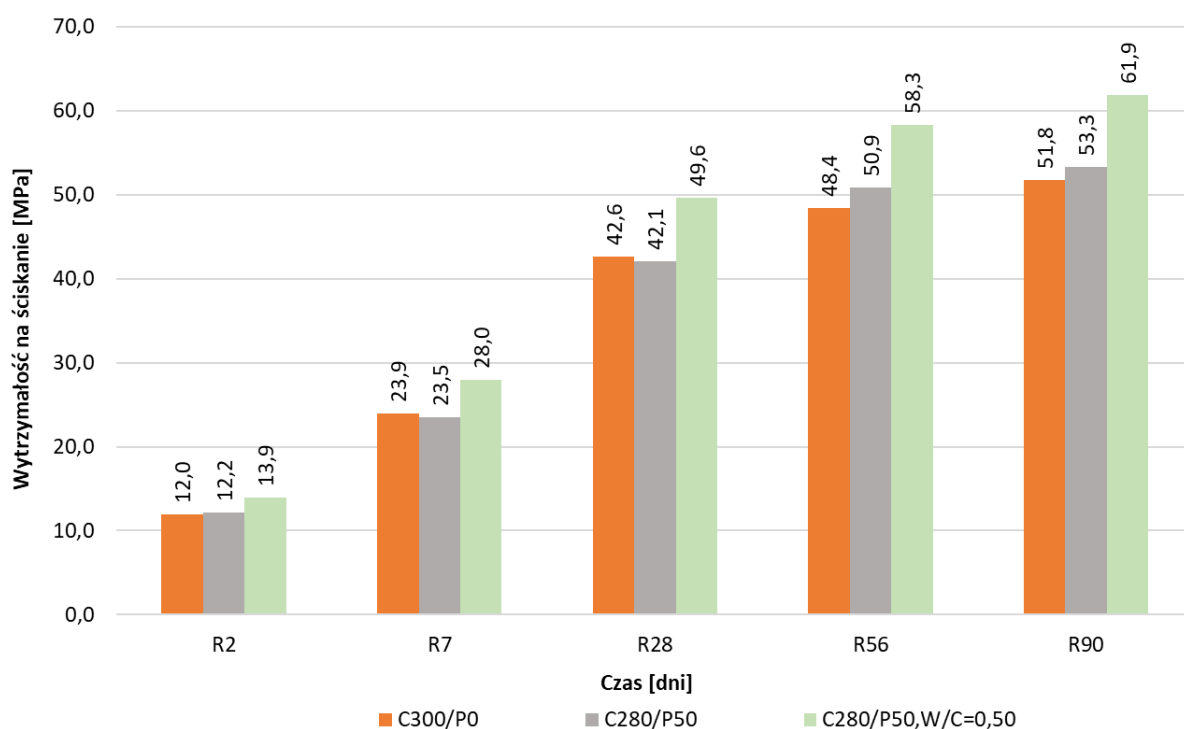
Głębokość penetracji CO₂ była większa w przypadku C300/P0 i C280/P50 i wyniosła odpowiednio 10,7 i 11,3 mm przy współczynnikach determinacji 0,998 oraz 0,1,000, podczas gdy dla mieszanki C280/P50, W/C=0,50 wartość ta osiągnęła 9,6 mm przy współczynniku determinacji 0,995.

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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 , 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 wielkopiecowego 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. Ścisławski, 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. Mądrowski, 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.