

Michał Drabczyk; Sebastian Kasper
Holcim Polska S.A.

"Beton Reaktywacja 2 – czyli o nowym dodatku do cementu na przykładzie CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N"

Streszczenie

Dynamicznie zmieniające się wymagania dotyczące produkcji materiałów budowlanych oraz zmiany w zakresie normalizacji, otwierają nowe możliwości w zakresie stosowania alternatywnych surowców w produkcji cementu. Mając to na uwadze autorzy referatu postanowili kontynuować rozpoczęty na poprzedniej, XII edycji Konferencji Dni Betonu 2023, cykl referatów p.t. „Beton – Reaktywacja”. W pierwszej części pracy dokonano analizy wpływu kruszyw grubych pochodzących z recyklingu betonu, typu A i typu B na właściwości betonu. Natomiast w części drugiej rozważa się problematykę ponownego wykorzystania betonu z recyklingu, jako głównego składnika cementu portlandzkiego wieloskładnikowego. Impulsem do podjęcia takich badań było wprowadzenie, jako pierwszego na polskim rynku, cementu zawierającego pył z gruz betonowego, CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N.

W celu porównania wpływu cementu z dodatkiem drobnych frakcji z recyklingu betonu (F) na właściwości oraz trwałość betonu, autorzy artykułu przeprowadzili badania betonów referencyjnych wykonanych na cementach CEM II/B-V 32,5 R i CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R oraz betonu na nowym cemencie CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N. W artykule przedstawiono wyniki analizy właściwości mieszanki i stwardniałego betonu oraz trwałości w zakresie, głębokości penetracji wody pod ciśnieniem jak również, co jest istotne z punktu widzenia zmian w Eurokodzie 2, wyniki badań karbonatyzacji metodą przyspieszoną oraz migracji jonów chlorkowych.

Abstrakt

Dynamically changing requirements for the production of building materials and changes in standardization open up new possibilities for the use of alternative raw materials in cement production. With this in mind, the authors of the paper decided to continue the series of papers entitled 'Concrete – Reactivation,' which began at the previous, XII edition of the Concrete Days Conference 2023. The first part of the work analyzed the influence of coarse aggregates derived from recycled concrete, type A and type B, on the properties of concrete. The second part, however, considers the issue of reusing recycled concrete as the main component of multi-component Portland cement. The impetus for undertaking such research was the introduction, as the first on the Polish market, of cement containing dust from concrete rubble, CEM II/C-M (V-F-LL) 32.5 N.

In order to compare the influence of cement with the addition of fine fractions from recycled concrete (F) on the properties and durability of concrete, the authors of the article conducted tests on reference concretes made with CEM II/B-V 32.5 R and CEM II/C-M (V-LL) 32.5 R cements, as well as concrete made with the new CEM II/C-M (V-F-LL) 32.5 N cement. The article presents the results of the analysis of the properties of the mix and hardened concrete, as well as durability in terms of water penetration

depth under pressure and, importantly from the perspective of changes in Eurocode 2, the results of accelerated carbonation and chloride ion migration tests.

1. Wprowadzenie

Współczesny przemysł budowlany stoi w obliczu znaczącego wyzwania, jakim jest rosnąca produkcja odpadów. Wśród tych odpadów, gruz betonowy stanowi jeden z głównych składników, generowany zarówno podczas rozbiórek i demontaży istniejących konstrukcji, jak i w trakcie remontów czy modernizacji. Efektywne zagospodarowanie tego materiału ma kluczowe znaczenie nie tylko z punktu widzenia logistyki, ale również w kontekście zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska. Gruz betonowy jest materiałem odpadowym, który powstaje w różnych fazach cyklu życia obiektu budowlanego. Do głównych źródeł jego pozyskiwania zalicza się rozbiórki budynków, remonty i modernizacje istniejących konstrukcji. Odpady te, ze względu na swój skład i właściwości, wymagają odpowiedniego przetworzenia przed ponownym wykorzystaniem. Proces przetwarzania gruzu betonowego jest kluczowy dla jego ponownego wykorzystania. Początkowo gruz poddawany jest rozdrobnieniu na mniejsze fragmenty, co ułatwia dalszą obróbkę. Następnie przeprowadza się segregację, mającą na celu oddzielenie poszczególnych frakcji materiału o różnej wielkości. Stosowanie sit separacyjnych pozwala na wydzielenie zanieczyszczeń, przed końcowym wykorzystaniem. Przetworzony gruz betonowy znajduje szerokie spektrum zastosowań w budownictwie. Jednym z podstawowych jest jego wykorzystanie jako kruszywo recyklingowe do produkcji betonu. Choć beton wytworzony z kruszyw recyklingowych może wykazywać pewne odmienne właściwości w porównaniu do betonu z kruszyw naturalnych, to jednak w wielu aplikacjach budowlanych stanowi on pełnowartościowy materiał. Ponadto, gruz betonowy może być używany do wyrównywania terenu, czy w inżynierii drogowej. W naszych rozważaniach skupimy się na wykorzystaniu pyłu betonowego z recyklingu. W Polsce znajduje on odzwierciedlenie w normalizacji. Przykładem takiego podejścia jest norma EN 197-6 „Cement – Część 6: Cement z materiałów budowlanych pochodzących z recyklingu.”, który definiuje nowy główny składnik cementu, jakim są frakcje drobne (pyły) z recyklingu betonu (z ang. recycled concrete fines) o oznaczeniu normowym F. Może on stanowić interesujący składnik cementu, zwłaszcza przy ograniczonej dostępności szeroko stosowanych w składzie cementu, zarówno popiołów lotnych, jak i granulowanego żużla wielkopiecowego. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań betonów projektowanych na cemencie zawierającym pył betonowy jako nowy dodatek na przykładzie CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N.

2. Charakterystyka pyłów z recyklingu betonu oraz cementów użytych w badaniach.

Cement CEM II/C-M(V-F-LL) 32,5 N z cementowni Holcim Kujawy wpisuje się w rozwój gospodarki obiegu zamkniętego, poprzez wykorzystanie w procesie produkcyjnym materiału mineralnego z recyklingu betonu. Do produkcji cementu CEM II/C-M(V-F-LL) 32,5 N użyto dodatku F o składzie tlenkowym oraz stratach prażenia przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1 Skład tlenkowy używanego gruzu betonowego.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Na ₂ O _{Eq}	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI	Suma
64,27	6,20	3,42	12,31	1,85	1,15	1,24	1,15	1,97	0,23	0,64	7,03	99,49

Natomiast podstawowe właściwości cementów, w zakresie wytrzymałości na ściskanie, wodożądności oraz powierzchni właściwej ujęto w tabeli 2.

Tabela 2 Wybrane właściwości przedstawianych cementów.

	Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	Wodożądność [%]	Blain [cm ² /g]
CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R	21,8	44,0	29,6	5544
CEM II/C-M(V-F-LL) 32,5 N	22,0	45,4	29,5	5525
CEM II/B-V 32,5 R - HSR/NA	16,6	45,4	26,1	4090

Składy rozpatrywanych cementów były godne z wymaganiami PN-EN 197-1, PN-EN 197-5 oraz PN-EN 197-6, a których autorzy nie mogą podać szczegółowo ze względu na tajemnicę producenta.

3. Wykaz przeprowadzonych badań oraz uzyskane wyniki podstawowych właściwości betonów z cementami CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R , CEM II/C-M(V-F-LL) 32,5 N oraz CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA

W ramach badań analizie poddano właściwości betonów przygotowanych zgodnie z PN-EN 206+A2. Porównywano cementy siostrzane tj.: CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N, CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R oraz CEM II/B-V 32,5 R - HSR/NA. Wykonano badania pod kątem wytrzymałości oraz trwałości betonu. Cementy pochodziły z cementowni Holcim. Zaprojektowano 5 receptur w klasach ekspozycji XC1, XC2, XC3, XC4/XD1, XC4/XD2 zgodnie z wymaganiami Tablicy F1 normy PN-B 06265:2022-08. W obrębie danej klasy ekspozycji utrzymano stałą zawartość cementu oraz w/c. Ustalono stały, procentowy udział wszystkich frakcji kruszyw w stosie okruszowym. Wykorzystano zmienną ilość plastyfikatora i zmienną ilość superplastyfikatora potrzebną do osiągnięcia porównywalnej konsystencji wyjściowej. W trakcie prac oznaczano parametry mieszanki betonowej po 10 i 90 minutach w zakresie konsystencji mierzonej metodą opadu stożka zgodnie z normą PN-EN 12350-2, gęstości wg normy PN-EN 12350-6 oraz zawartości powietrza metodą ciśnieniową zgodnie z normą PN-EN 12350-7. Beton stwardniały zbadano pod kątem wytrzymałości na ściskanie zgodnie z PN-EN 12390-3, współczynnik migracji jonów chlorkowych według PN-EN 12390-18, odporności betonu na karbonatyzację metodą przyspieszoną według PN-EN 12390-12 oraz penetracji wody pod ciśnieniem według PN-EN 12390-8.

3.1. Wyniki badań konsystencji, gęstości i zawartości powietrza.

Na potrzeby badań mieszanki betonowe projektowano w taki sposób aby wyjściowa konsystencja była na poziomie 190 mm +/- 20 mm. Współczynnik wodno-cementowy utrzymywano na stałym poziomie, natomiast w koniecznych przypadkach skład korygowano domieszką upłynniającą lub uplastyczniającą. Wszystkie rozwiązania sprawdzono również po 90 minutach.

Uzyskane wyniki zaprezentowano w tabeli 3.

Tabela 3 Wyniki konsystencji, zawartości powietrza i gęstości mieszanki betonowej.

Numer receptury		(1) CEM II/C- M(V- LL)32,5 R	(2) CEM II/C-M (V-F- LL)32,5 R	(3) CEM II/B-V 32,5 R - HSR/N A	(4) CEM II/C- M(V- LL)32,5 R	(5) CEM II/C-M (V-F- LL)32,5 R	(6) CEM II/B-V 32,5 R - HSR/N A	(7) CEM II/C- M(V- LL)32,5 R	(8) CEM II/C-M (V-F- LL)32,5 R	(9) CEM II/B-V 32,5 R - HSR/N A	(10) CEM II/C- M(V- LL)32,5 R	(11) CEM II/C-M (V-F- LL)32,5 R	(12) CEM II/B-V 32,5 R - HSR/N A	(13) CEM II/C- M(V- LL)32,5 R	(14) CEM II/C-M (V-F- LL)32,5 R	(15) CEM II/B-V 32,5 R - HSR/N A
Opad stożka 10'	mm	175	190	190	190	200	200	190	210	195	185	190	190	180	195	205
Powietrze 10'	%	2,5	1,4	1,2	2,2	2,3	1,5	3,3	2,5	2,5	2,7	2,9	2,1	3,6	4,2	2,2
Gęstość 10'	kg/d m³	2,338	2,383	2,367	2,335	2,336	2,369	2,346	2,370	2,375	2,310	2,338	2,354	2,334	2,307	2,360
Opad stożka 90'	mm	110	160	150	140	150	155	125	165	145	100	155	115	95	100	130
Powietrze 90'	%	2,4	1,6	1,2	2,2	2,6	2,0	2,3	2,4	1,8	2,0	2,4	2,8	2,4	2,5	2,2
Gęstość 90'	kg/d m³	2,361	2,370	2,371	2,340	2,321	2,342	2,380	2,373	2,381	2,375	2,347	2,346	2,347	2,357	2,370

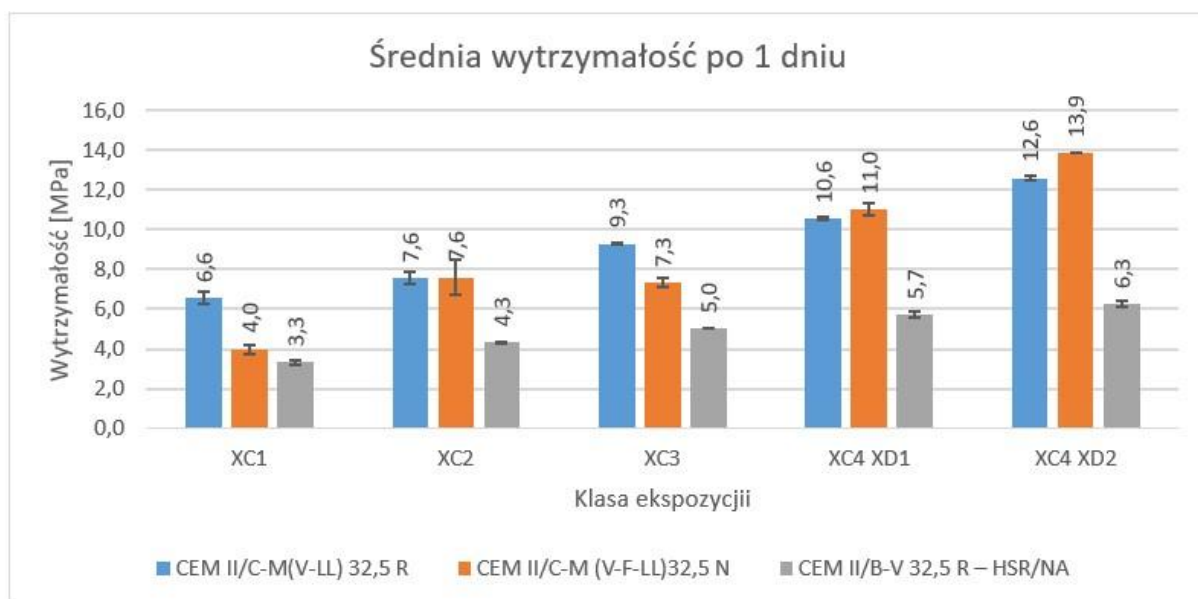
3.2. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wykonanych betonów.

W celu oznaczenia wytrzymałości na ściskanie zgodnie z normą PN-EN 12390-3 zaformowano 15 kostek (a=100 mm) z każdego zarobu celem wykonania badania po 1, 2, 7, 28 i 56 dniach dojrzewania. Próbkę zaformowano i przechowywano zgodnie z normą PN-EN 12390-2. Każdy z uzyskanych wyników został dodatkowo przemnożony przez współczynnik 0,95 celem uzyskania wartości odpowiadającej wytrzymałości otrzymanej w badaniu na próbkach o wymiarze boku a=150 mm. Otrzymane wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskane na kostkach 100 mm przeliczone na kostki 150 mm przedstawiono w tabeli nr 4.

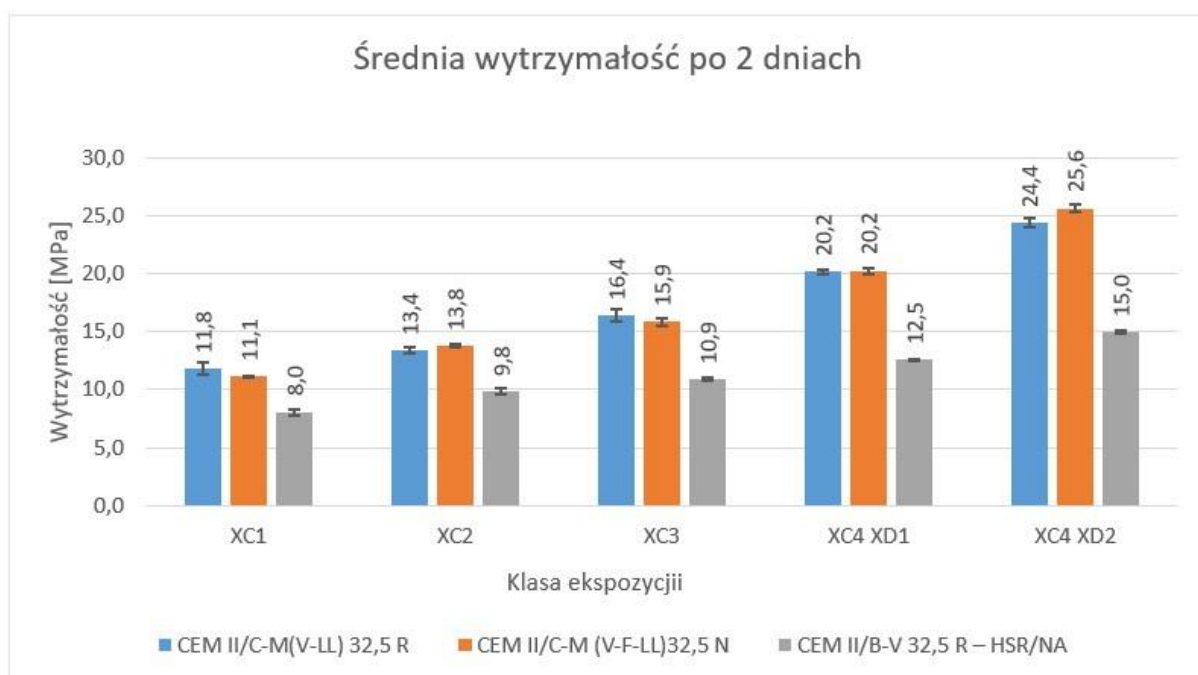
Tabela 4 Zestawienie wyników badań wytrzymałości na ściskanie.

Klasa ekspozycji	Klasa wytrzymałości	Rodzaj cementu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				
			fc1	fc2	fc7	fc28	fc56
XC1	C16/20	CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R	6,6	11,8	17,5	22,6	27,2
XC1	C16/20	CEM II/C-M(V-F-LL) 32,5 N	4,0	11,1	18,2	24,9	31,1
XC1	C16/20	CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA	3,3	8,0	14,6	23,0	28,2
XC2	C16/20	CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R	7,6	13,4	19,6	26,1	31,0
XC2	C16/20	CEM II/C-M(V-F-LL) 32,5 N	7,6	13,8	21,1	29,2	34,9
XC2	C16/20	CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA	4,3	9,8	19,2	28,3	35,1
XC3	C20/25	CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R	9,3	16,4	23,4	30,8	37,0
XC3	C20/25	CEM II/C-M(V-F-LL) 32,5 N	7,3	15,9	25,0	33,5	40,6
XC3	C20/25	CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA	5,0	10,9	21,7	33,2	40,3
XC4 XD1	C30/37	CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R	10,6	20,2	28,6	38,5	44,8
XC4 XD1	C30/37	CEM II/C-M(V-F-LL) 32,5 N	11,0	20,2	31,3	41,9	50,0
XC4 XD1	C30/37	CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA	5,7	12,5	23,9	36,3	45,9
XC4 XD2	C30/37	CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R	12,6	24,4	35,1	44,3	52,0
XC4 XD2	C30/37	CEM II/C-M(V-F-LL) 32,5 N	13,9	25,6	36,0	46,7	55,6
XC4 XD2	C30/37	CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA	6,3	15,0	29,0	42,6	52,4

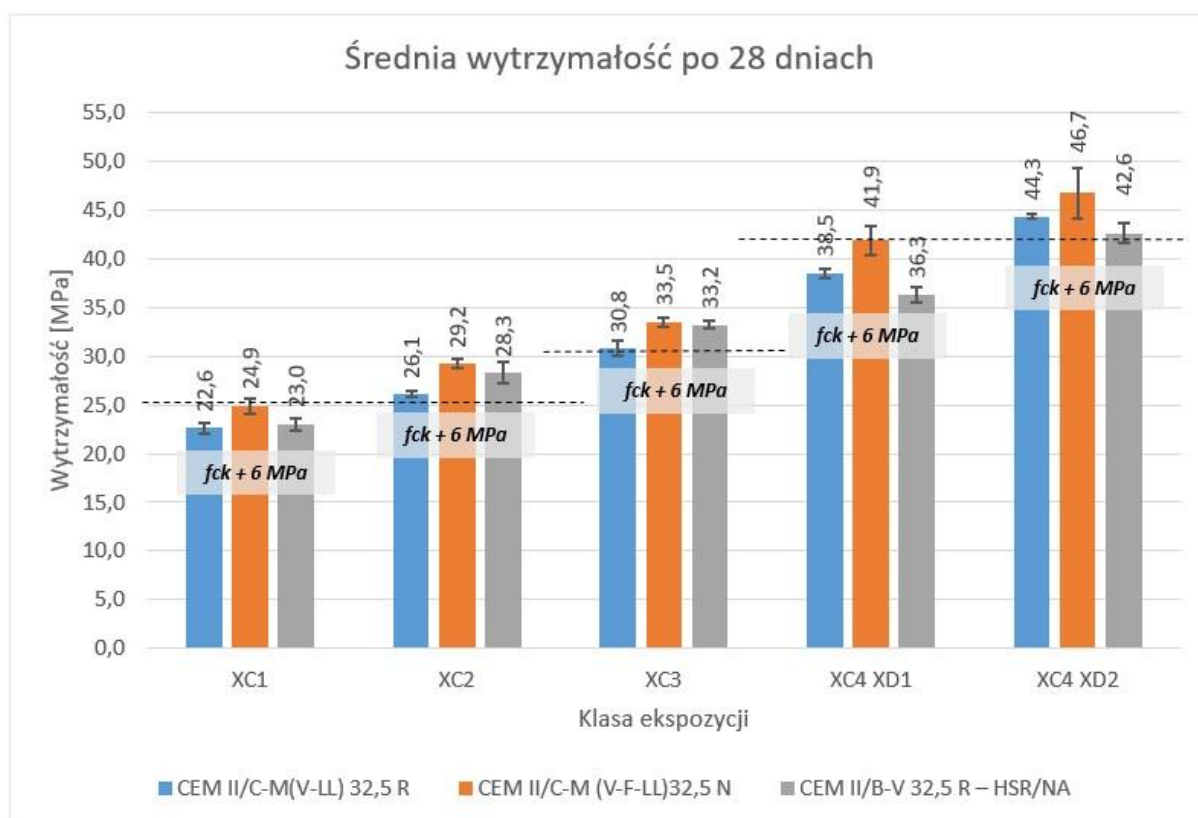
Dla lepszego zobrazowania uzyskanych wyników wytrzymałości przedstawione zostały w formie graficznej wraz z odchyleniem standardowym na rysunkach 1, 2, 3 i 4.



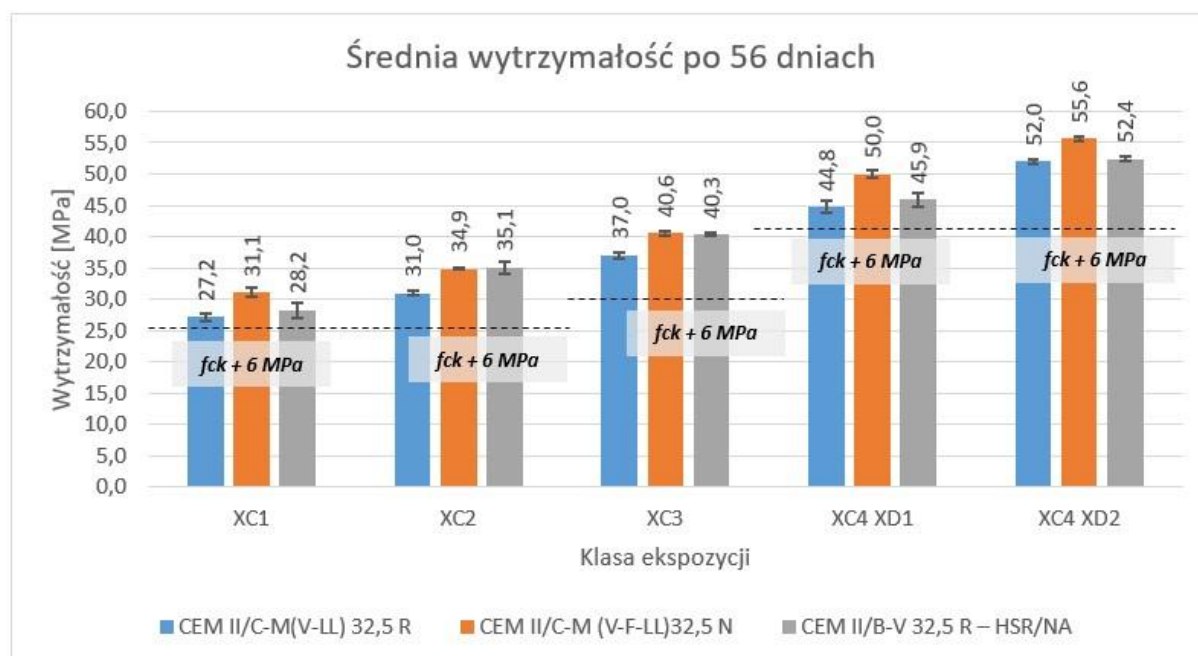
Rysunek 1 Porównanie wytrzymałości na ściskanie betonów po 1 dniu.



Rysunek 2 Porównanie wytrzymałości na ściskanie betonów po 2 dniach.



Rysunek 3 Porównanie wytrzymałości na ściskanie betonów po 28 dniach.



Rysunek 4 Porównanie wytrzymałości na ściskanie betonów po 56 dniach.

Wytrzymałości wczesne, na CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N w żadnym stopniu nie odstają od wartości wytrzymałości uzyskanych na CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R. W tym terminie CEM II/B-V 32,5 R -HSR/NA wypada najgorzej.

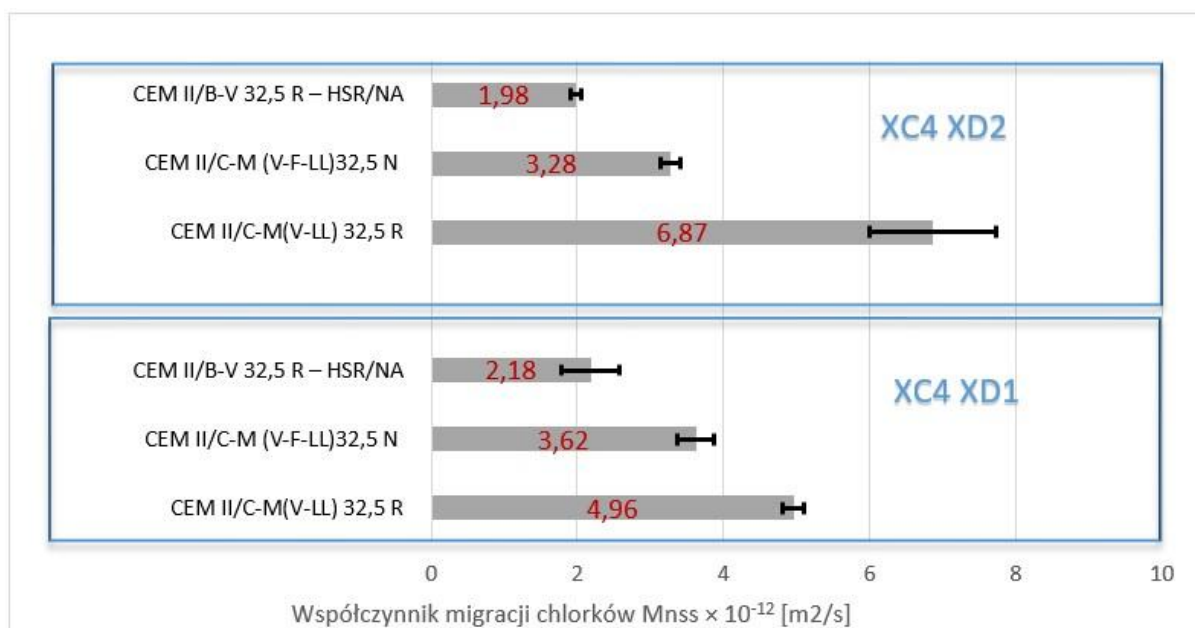
Oceniając spełnienie wymaganej klasy wytrzymałości w zależności od zakładanej klasy ekspozycji od XC1 do XC4 można stwierdzić, że dla badanych serii betonów po 28 dniach wymaganą klasę wytrzymałości uzyskano dla betonów:

- XC2 – dla wszystkich zastosowanych cementów.
- XC3 – wymagania spełnił beton na CEM II/C-M(V-F-LL) 32,5 N oraz CEM II/B-V 32,5 R -HSR/NA
- XC4 XD2 - wymagania spełnił beton na CEM II/C-M(V-F-LL) 32,5 N oraz CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R

Po 56 dniach dojrzewania wymaganą klasę wytrzymałości według tablicy F.1 spełniły wszystkie betony.

3.3. Oznaczanie współczynnika migracji jonów chlorkowych

Kolejnym przeanalizowanym parametrem betonów była odporność na korozję chlorkową oznaczona w badaniu niestacjonarnej migracji jonów chlorkowych, wykonanym zgodnie z normą PN-EN 12390-18:2021-08. W celu wykonania tego badania zaformowano po 3 próbki $d=100\text{mm}$ i $h=120\text{mm}$, które następnie przycięto do wysokości $h=50\pm 2\text{ mm}$, zgodnie z wytycznymi normy badawczej. Badanie wykonane po upływie 90 dni od momentu zaformowania próbek. Badanie wykonano dla klas ekspozycji XD1 oraz XD2. Jako wynik przedstawiono średni współczynnik migracji jonów chlorkowych dla betonów wraz z odchyleniem standardowym. Rysunek nr 5.



Rysunek 5 Oznaczanie współczynnika migracji chlorków.

Zaprezentowane wyniki wskazują na zmniejszenie migracji jonów chlorkowych dla betonów wykonanych na CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N względem CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R w obu wariantach. Najniższy wynik natomiast uzyskał beton na CEM II/B-V 32,5 R - HSR/NA osiągając $1,98 \text{ Mnss} \times 10^{-12} [\text{m}^2/\text{s}]$ dla klasy XD2 oraz $2,18 \text{ Mnss} \times 10^{-12} [\text{m}^2/\text{s}]$ dla XD1. Jak pokazują dane z literatury (Rysunek 6) klasa odporności jaką uzyskano dla betonu na CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N jest o stopień wyższa. CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N plasuje się w kategorii bardzo wysokiej odporności. Natomiast beton na CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R w klasie wysokiej odporności.

Klasa odporności	Zakres współczynnika migracji D_{nssm} [m ² /s]
Niska odporność	$D_{nssm} > 16 \times 10^{-12}$
Średnia odporność	$8 \times 10^{-12} < D_{nssm} \leq 16 \times 10^{-12}$
Wysoka odporność	$4 \times 10^{-12} < D_{nssm} \leq 8 \times 10^{-12}$
Bardzo wysoka odporność	$2 \times 10^{-12} < D_{nssm} \leq 4 \times 10^{-12}$
Ekstremalna odporność	$D_{nssm} \leq 2 \times 10^{-12}$

Rysunek 6 Zakres współczynnika migracji jonów chlorkowych wg. [11]

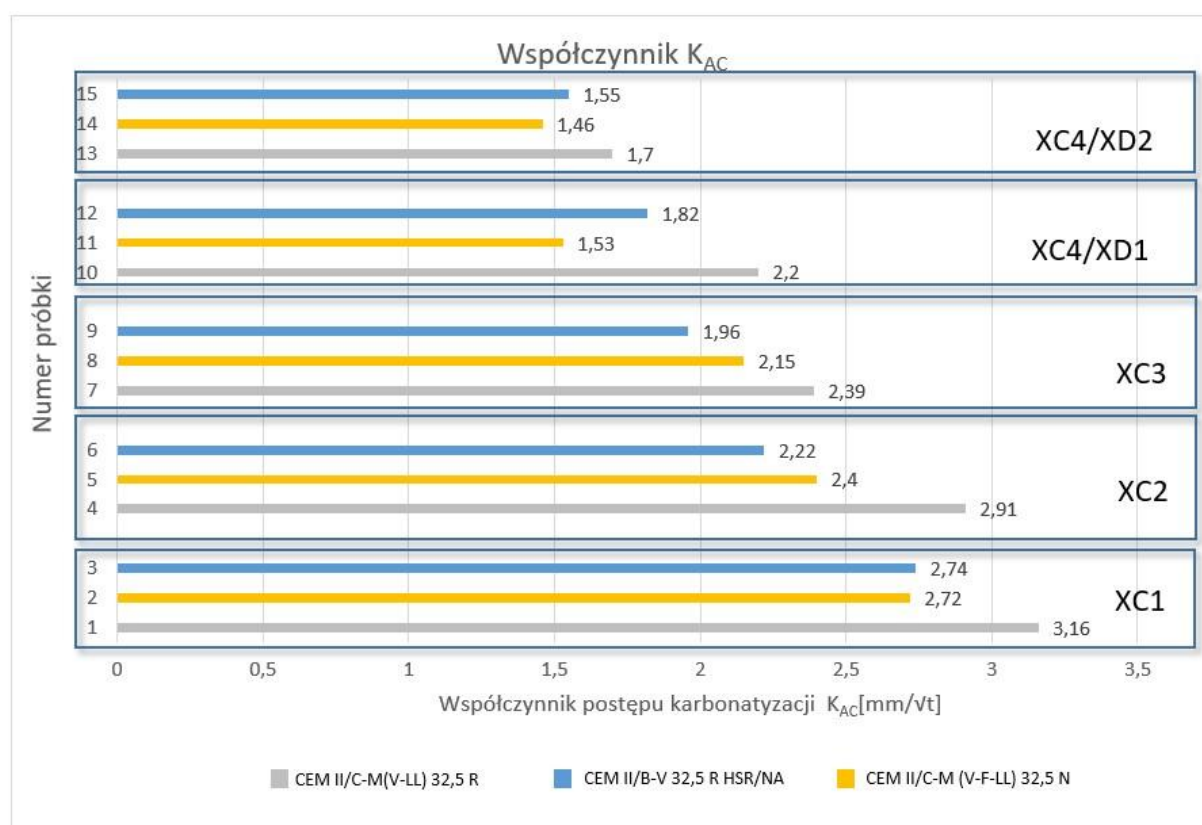
Zaprezentowany podział może być dobrym odniesieniem do uzyskanych wyników, gdyż brakuje znormalizowanych wytycznych dotyczących klas odporności korozyjnych względem uzyskanych wyników wsółczynnika migracji jonów chlorkowych.

3.4. Wyniki badań głębokości karbonatyzacji betonów.

Ocenie poddano również odporność betonów na karbonatyzację. Badanie wykonano metodą przyspieszoną zgodnie z normą PN-EN 12390-12:2020-06. Do oznaczenia karbonatyzacji betonu metodą przyspieszoną zaformowano po 8 próbek, kostek $a=100\text{mm}$. Badanie wykonane zostało po 28 dniach dojrzewania betonu w wodzie i 14 dniach dojrzewania w komorze klimatycznej w określonych warunkach temperatury i wilgotności, po czym próbki poddano oddziaływaniu 3% CO_2 przez 7, 28 i 70 dni, zgodnie z normą badawczą. Jako wynik przedstawiono średnią głębokość karbonatyzacji odpowiednio dla próbek zbadanych po 0, 7, 28 i 70 dniach kondycjonowania oraz współczynnik karbonatyzacji. Jako wskaźnika do oceny grubości strefy skarbonatyzowanej użyto tymoloftaleiny. Naniesienie tego odczynnika na powierzchnię świeżego przełamu betonu powoduje zabarwienie betonu nieskarbonatyzowanego na kolor ciemno niebieski. Warstwa betonu skarbonatyzowanego nie ulega zabarwieniu. Jako graniczną wielkość rozdzielającą obie fazy betonu przyjmuje się $\text{pH} \sim 9,3$ do 10,5. W tabeli 5 oraz na rysunku 7 przedstawiono uzyskane wartości głębokości karbonatyzacji (D_K) i współczynnik karbonatyzacji (K_{AC}).

Tabela 5 Wyniki głębokości karbonatyzacji i współczynnika karbonatyzacji.

Rodzaj cementu		(1) CEM II/C- M(V- LL) 32,5 R	(2) CEM II/C-M (V-F- LL)32,5 N	(3) CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA	(4) CEM II/C- M(V- LL) 32,5 R	(5) CEM II/C-M (V-F- LL)32,5 N	(6) CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA	(7) CEM II/C- M(V- LL) 32,5 R	(8) CEM II/C-M (V-F- LL)32,5 N	(9) CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA	(10) CEM II/C- M(V- LL) 32,5 R	(11) CEM II/C-M (V-F- LL)32,5 N	(12) CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA	(13) CEM II/C- M(V- LL) 32,5 R	(14) CEM II/C-M (V-F- LL)32,5 N	(15) CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA
Klasa ekspozycji		XC1			XC2			XC3			XC4 XD1			XC4 XD2		
dk 7	mm	5,1	4,4	8,3	7,4	5,6	6,6	6,0	5,2	6,8	4,0	3,9	3,6	2,6	2,1	2,6
dk 28	mm	15,2	12,8	14,2	13,3	12,0	12,4	11,6	10,9	10,5	9,7	7,8	10,0	8,4	7,3	8,2
dk 70	mm	26,2	22,6	24,1	25,0	20,7	18,7	20,2	18,0	17,1	16,6	12,7	15,1	14,1	11,7	12,5
Kac70	mm/√t	3,2	2,7	2,7	2,9	2,4	2,2	2,4	2,2	2,0	2,2	1,5	1,8	1,7	1,5	1,6
R2	-	0,98	0,98	1,00	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98



Rysunek 7 Współczynnik postępu karbonatyzacji badanych betonów.

Analiza graficzna rozkładu współczynnika postępu karbonatyzacji (rysunek 7) w zależności od zastosowanego cementu, ukazuje trend spadku zasięgu karbonatyzacji w próbkach z udziałem CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N względem cementu CEM II/C-M (V-LL) 32,5 N bez dodatku pyłu z recyklingu betonu. Natomiast jeśli chodzi o porównanie wyników betonów na CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N względem tych na CEM II/B-V 32,5 R HSR/NA w niskich klasach ekspozycji XC1, XC2, XC3 to są one porównywalne. Dla klas ekspozycji XC4/XD1 oraz XC4/XD2 najkorzystniejsze parametry osiąga beton wykonany na CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N. Wszystkie wartości współczynnika determinacji R^2 uzyskały wartości powyżej 0,95.

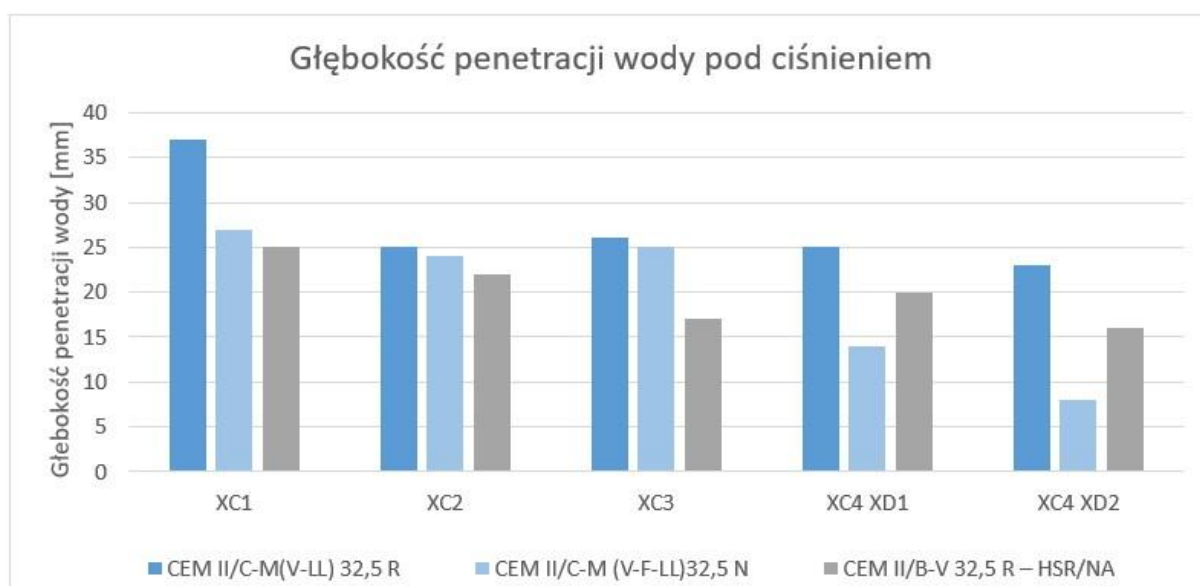
W celu porównania uzyskanych wyników należy mieć na uwadze również powtarzalność metody badawczej, która w przypadku badania karbonatyzacji zgodnie z PN-EN 12390-12, tabela 1, w zakresie uzyskanych wartości współczynnika K_{AC} wynosi od 0,2 – 0,3 mm/ $\sqrt{\text{dzień}}$. Mając na uwadze powyższe oraz ustalając beton odniesienia jako beton na cemencie CEM II/B-V 32,5 R - HSR/NA, można wyciągnąć następujące wnioski:

- dla klasy ekspozycji XC1 wynik karbonatyzacji betonu na CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R znacznie odstaje od referencji, a dokładnie o 0,42 mm/ $\sqrt{\text{dzień}}$. Natomiast różnica między karbonatyzacją betonu na CEM II/B-V 32,5 R - HSR/NA a CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N jest nieznaczna, na poziomie 0,02 mm/ $\sqrt{\text{dzień}}$
- dla klasy ekspozycji XC2 wynik dla CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R jest istotnie wyższy od referencji, o 0,69 mm/ $\sqrt{\text{dzień}}$. Różnica między CEM II/B-V 32,5 R - HSR/NA a CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N jest na poziomie 0,18 mm/ $\sqrt{\text{dzień}}$, tak więc w zakresie odtwarzalności metody

- dla klasy ekspozycji XC3 wynik dla betonu na CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R jest istotnie wyższy o 0,43 mm/ $\sqrt{\text{dzień}}$ od referencji. Podobnie jak poprzednio, dla klasy XC2, różnica między CEM II/B-V 32,5 R - HSR/NA a CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N jest na poziomie 0,19 mm/ $\sqrt{\text{dzień}}$
- dla klas ekspozycji XC4 XD1 wynik dla betonu na CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R jest znacząco wyższy od referencji, o 0,38 mm/ $\sqrt{\text{dzień}}$. W tym przypadku znacznie niższą wartość współczynnika Kac (o 0,29 mm/ $\sqrt{\text{dzień}}$) uzyskano dla betonu na cemencie CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 R.
- dla klas ekspozycji XC4 XD2 wyniki badań karbonatyzacji można zinterpretować jako podobne do betonu odniesienia

3.5. Wyniki badania głębokości penetracji wody pod ciśnieniem.

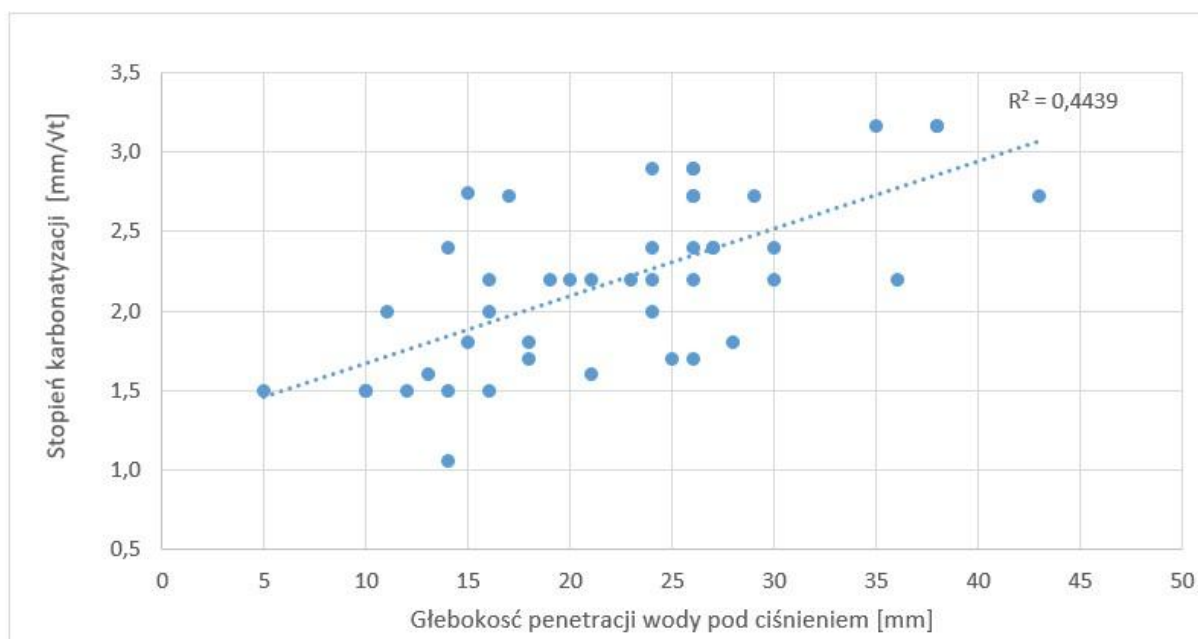
Zgodnie z normą EN 12390-8:2009 przeprowadzono badania głębokości penetracji wody pod ciśnieniem dla betonów we wszystkich badanych klasach ekspozycji. Wyniki badań pomiarów głębokości zaprezentowano na rysunku 8 jako średni wynik z 3 próbek.



Rysunek 8 Wyniki głębokości penetracji wody pod ciśnieniem.

W klasach ekspozycji XC1 XC2 oraz XC3 głębokość penetracji wody pod ciśnieniem jest najniższa dla betonu na CEM II/B-V 32,5 R - HSR/NA. Natomiast w klasach ekspozycji XC4 XD1 oraz XD2 najniższą wartość uzyskały betony na CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N, czyli cemencie z dodatkiem pyłu recyklingowego.

Wykorzystując wyniki badania głębokości penetracji wody pod ciśnieniem zestawiono je również z wynikami badań karbonatyzacji, chcąc sprawdzić tym samym ewentualną zależność tych dwóch parametrów (rysunek 9).



Rysunek 9 Wykres zależności stopnia karbonatyzacji K_{AC} od głębokości penetracji wody.

W ocenie autorów dopasowanie na poziomie 45 % wyników do proponowanego modelu może być dobrym wstępem do poprowadzenia dalszych badań w zakresie zależności porównywanych parametrów. Możliwość korelacji głębokości karbonatyzacji i głębokości wnikania wody w strukturę betonu, z jednej strony umożliwiłoby skrócenie czasu oczekiwania na wynik z 70 dni (czas trwania badania karbonatyzacji metodą przyspieszoną) do 3 dni (czas badania penetracji wody pod ciśnieniem). Z drugiej strony dałoby możliwość powszechniejszego badania i potwierdzania trwałości betonu poprzez bardziej znaną i rozpowszechnioną metodę.

4. Analiza i Wnioski

- Wszystkie betony na analizowanych cementach uzyskały zakładaną klasę wytrzymałości po 56 dniach dojrzewania. Wytrzymałości wczesne betonów uzyskane na CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N oraz CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R są porównywalne we wszystkich klasach ekspozycji. Beton na CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA w pierwszym i drugim dniu osiąga najniższe wartości.
- Uzyskanie odpowiedniej konsystencji wymagało użycia różnych ilości superplastyfikatora w zależności od stosowanego cementu. Mieszanka betonowa na CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N potrzebowała najmniejszej ilości domieszki do uzyskania porównywalnej konsystencji co mieszanka na CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA. W porównaniu z CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R ilość ta była mniejsza o 0,12 % masy cementu w klasie ekspozycji XC4/XD2 oraz o 0,2% m.c. w XC4/XD1. W klasach ekspozycji XC1, XC2 oraz XC3 te różnice są nieznaczne z powodu wyższego wskaźnika w/c. W zestawieniu CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5 N z CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA ilość domieszki była bardzo podobna. By jednak wykazać większą zależność w tym zakresie należało by przeprowadzić dodatkowe badania porównawcze.

- c) W badaniu migracji jonów chlorkowych, beton wykonany z CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA okazał się najbardziej odporny. Jednak beton z CEM II/C-M(V-F-LL) 32,5 N, wzbogacony o dodatek pyłu z recyklingu betonu, wykazał znacznie lepsze parametry szczelności w porównaniu z CEM II/C-M(V-LL) 32,5 R. W XD1 wartość migracji poprawiła się o $1,34 \text{ Mnss} \times 10^{-12} [\text{m}^2/\text{s}]$, a w XD2 o $3,59 \text{ Mnss} \times 10^{-12} [\text{m}^2/\text{s}]$.
- d) Analizując otrzymane wyniki odporności na karbonatyzację można zauważyć, najwyższą odporność dla betonu na CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA a najniższą na CEM II/C-M(V-LL) 32,5 N z wyjątkiem receptur projektowanych w klasach ekspozycji XC4 XD2. Zastosowanie cementu z dodatkiem „F” poprawia odporność betonu na karbonatyzację, która jest zbliżona do betonu na CEM II/B-V 32,5 R – HSR/NA.
- e) Zastosowanie nowego dodatku oznaczonego „F” jako składnika głównego w cemencie portlandzkim wieloskładnikowym, w ilości stosowanej przez producenta, wpływa na zmniejszenie wodo- i domieszko- żądności mieszanki betonowej w porównaniu do mieszanek na cemencie (V-LL). Poprawia również wytrzymałości 28 i 56 dniowe betonów oraz trwałość w aspekcie karbonatyzacji oraz migracji jonów chlorkowych. Jednak na uwadze należy mieć potencjalną zmienność tego dodatku wynikająca z różnych źródeł jego pozyskania co bezpośrednio może przekładać się na jakość cementów produkowanych z jego udziałem.

5. Literatura

- [1] PN-EN 206+A2: Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [2] PN-B 06265:2022-08: Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Uzupełnienie krajowe PN-EN 206+A2:2021-08.
- [3] PN-EN 12350-2: Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- [4] PN-EN 12350-6: Badania mieszanki betonowej – Część 6: Gęstość.
- [5] PN-EN 12350-7: Badania mieszanki betonowej – Część 7: Zawartość powietrza – Metody ciśnieniowe.
- [6] PN-EN 12390-3: Badania betonu stwardniałego – Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań.
- [7] PN-EN 12390-18: Badania betonu stwardniałego – Część 18: Oznaczanie współczynnika migracji jonów chlorkowych.
- [8] PN-EN 12390-12: Badania betonu stwardniałego – Część 12: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację – Metoda przyspieszona.
- [9] PN-EN 12390-8: Badania betonu stwardniałego – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.
- [10] PN-EN 197-6:2023 Cement – Część 6: Cement z recyklingowymi materiałami budowlanymi
- [11] Tang, L. (1996) *Chloride Transport in Concrete - Measurement and Prediction*. Doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, Göteborg, Szwecja.
- [12] Kourosh, M. Mohammadi, A. Shirzadi (2021) Using Fines from Recycled High-Quality Concrete as a Substitute for Cement
- [13] Ł. Sadowski, J. Krawczyk (2017) Ecological aspect of waste concrete fines application as cement replacement in fine-grained composites.

- [14] L. Yang, Z. B. Feng, Y. H. Guo, J. Yang (2021) The Durability of Recycled Fine Aggregate Concrete: A Review
- [15] G. Bajorek P. Górak A. Łagosz (2023) Ocena właściwości użytkowych betonu z cementem CEM II/C-M w aspekcie rozszerzenia obszaru możliwości aplikacji