

Ocena właściwości użytkowych betonu z cementem CEM II/C-M w aspekcie rozszerzenia obszaru możliwości aplikacji

EVALUATION OF PERFORMANCE PROPERTIES OF CONCRETE WITH CEM II/C-M CEMENT IN TERMS OF APPLICATION EXTENDING

Streszczenie

Cementy CEM II/C-M to stosunkowo nowe kompozycje surowcowe podążające w kierunku poszukiwań możliwości obniżenia emisyjności związanej z procesem ich produkcji poprzez redukcję udziału klinkieru. Dodatkowo, poprzez zastosowanie efektu synergicznego w wyniku połączenia składników głównych nieklinkierowych udało się uzyskać nową „rodzinę” cementów o bardzo ciekawych i nieoczywistych właściwościach. Jednakże ze względu na to, że cementy tego rodzaju są spoiwami nowymi (pomimo doskonale znanych właściwości ich składników), możliwość ich aplikacji w betonie została ograniczona zapisami normy PN-B 06265:2022-08 do stosunkowo wąskich obszarów.

Zaprezentowane wyniki obejmują badania betonów wykonanych z cementami CEM II/C-M spełniających minimalne kryteria normy PN-B-06265:2022-08 w zakresie składu dla klas ekspozycji od XC1 do XC4, które miały na celu porównanie ich właściwości z betonami referencyjnymi, wykonanymi z użyciem cementu CEM II/B-V 32,5 R. Na podstawie wyników badań wytrzymałości na ściskanie dokonano oceny uzyskanych klas oraz przeprowadzono ocenę przy zastosowaniu kryteriów akceptacji wyników badań wstępnych według załącznika A normy PN-EN 206. Uzyskane betony poddano dodatkowo badaniom o charakterze trwałościowym, tj. głębokości penetracji wody pod ciśnieniem po 28 dniach dojrzewania. W przypadku betonów wykonanych w oparciu o cement CEM II/C-M(W-LL) 32,5R oraz cement referencyjny CEM II/B-V 32,5R wykonano również badania głębokości karbonatyzacji po 56 dniach wstępnego dojrzewania. Prezentowane wyniki badań wykazały, że betony wykonane w oparciu o cementy CEM II/C-M, o specjalnie dobranych udziałach składników głównych, uzyskują właściwości gwarantujące spełnienie kryteriów cech wytrzymałościowych nie niższych niż betony

dr inż. Grzegorz Bajorek, prof. PRz – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa Inżynierii Środowiska i Architektury, Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji Sp. z o.o.

mgr inż. Piotr Górak – CEMEX Polska Sp. z o.o.

dr hab. inż. Artur Łagosz, prof. AGH – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki

wykonane w oparciu o cement referencyjny CEM II/B-V. Wyniki badań w zakresie głębokości karbonatyzacji, przeprowadzone dla betonów klas ekspozycji XC2 i XC4 wykonanych w oparciu o cement CEM II/C-M(W-LL) 32,5R oraz cement referencyjny CEM II/B-V 32,5R wykazały ponadto, że nowy rodzaj spoiwa, o składzie użytym do jego przygotowania, którego zakres stosowania ograniczono w krajowym uzupełnieniu PN-B 06265:2022-08 tylko do klas ekspozycji XC1 i XC2 może być z powodzeniem zastosowany również do klas ekspozycji XC3 oraz XC4.

Abstract

CEM II/C-M cements are relatively new raw material compositions that are heading towards the search for possibilities to reduce emissivity associated with the process of their production by reducing the share of clinker. In addition, by using the synergistic effect as a result of combining the main non-clinker components, it was possible to obtain a new „family” of cements with very interesting and unobvious properties. However, due to the fact that cements of this type are new binders (despite the well-known properties of their components), the possibility of their application in concrete has been limited by the provisions of the PN-B 06265:2022-08 standard to relatively narrow areas.

The presented results include tests of concretes made with CEM II/C-M cements that meet the minimum criteria of the PN-B-06265:2022-08 standard in terms of composition for exposure classes from XC1 to XC4, which aimed to compare their properties with reference concretes made with cement CEM II/B-V 32.5 R. Based on the results of compressive strength tests, the obtained classes were assessed and the evaluation was carried out using the acceptance criteria for the results of preliminary tests according to Annex A of the PN-EN 206 standard.

The obtained concretes were additionally subjected to durability tests, i.e. the depth of water penetration under pressure after 28 days of maturation. In the case of concretes made on the basis of cement CEM II/C-M(W-LL) 32.5R and reference cement CEM II/B-V 32.5R, carbonation depth tests were also performed after 56 days of initial maturation. The presented test results showed that concretes made on the basis of CEM II/C-M cements, with specially selected proportions of main components, obtain properties that guarantee meeting the criteria of strength properties, not lower than concretes made on the basis of the reference cement CEM II/B-V. The results of carbonation depth tests carried out for concretes of XC2 and XC4 exposure classes made on the basis of cement CEM II/C-M(W-LL) 32.5R and the reference cement CEM II/B-V 32.5R also showed that the new type of binder, with the composition used for its preparation, the scope of application of which is limited in the national supplement to PN-B 06265:2022-08 only to XC1 and XC2 exposure classes, can also be successfully applied to XC3 and XC4 exposure classes.

1. Wprowadzenie

Powstrzymanie globalnego ocieplenia i postępującej na wielką skalę degradacji naszych zasobów naturalnych to cel numer jeden naszej cywilizacji. Wszystkie niekorzystne zmiany w światowym ekosystemie inicjują gwałtowne zjawiska pogodowe, wpływając negatywnie na życie milionów ludzi i przynosząc ogromne straty dla gospodarki. Europejski Zielony Ład i pakiet Fit for 55, to tylko niektóre drogi i strategie kierujące gospodarkę na właściwą zieloną drogę zrównoważonego rozwoju. To jedyna szansa na obronę jakości naszego życia, zatrzymania postępujących zmian klimatu czy w końcu uratowanie ludzkości przed hekatombą. Dlatego, tak cenna jest każda aktywność mogąca mieć istotne znaczenie w ograniczeniu emisji zanieczyszczeń, stosowaniu gospodarki obiegu zamkniętego czy też redukcji emisji gazów cieplarnianych. Strategie klimatyczne przyjmowane w różnych krajach, branżach i firmach to przede wszystkim świadomy wybór i jedyna logiczna alternatywa przyszłego rozwoju.

Obecnie pojawia się wielkie wyzwanie dla całego sektora budowlanego odpowiedzialnego za znaczną część światowej emisji gazów cieplarnianych [1]. Z wyzwaniem i odpowiedzialnością pojawia się także szereg możliwości i szans.

Przemysł cementowy od lat aktywnie poszukuje rozwiązań oraz technologii pozwalających obniżyć emisję CO₂. Oprócz aspektu ekologicznego, równie ważną rolę odgrywa aspekt ekonomiczny. Koszty związane z emisją CO₂ rosną z roku na rok, jednak stoi za tym oczywista inwestycja w przyszłość i zieloną transformację całej europejskiej gospodarki, choć przy znacznym obciążeniu przemysłu ciężkiego, a w konsekwencji końcowych odbiorców produktów [2].

Nowoczesne technologie produkcji cementu, a także optymalizacja procesów produkcyjnych, jak również stosowanie paliw alternatywnych jako nośników energii w procesie wytwarzania klinkieru prowadzą do osiągnięcia zamierzonych celów klimatycznych opisanych przez branżę. Europejskie Stowarzyszenie Przemysłu Cementowego CEMBU-REAU oraz Stowarzyszenie Producentów Cementu w Polsce opracowały mapę drogową zakładającą osiągnięcie neutralności klimatycznej w układzie promującym współpracę w łańcuchu wartości 5C klinkier-cement-beton-budownictwo karbonatyzacja (5C clinker-cement-concrete-construction-carbonation) [3]. W założeniu strategia ta opiera się na poprawie efektywności energetycznej, stosowaniu paliw alternatywnych, rozwinięciu cementów z dodatkami mineralnymi, optymalizacji w procesie projektowania mieszanek betonowych oraz rozwoju technologii wychwytywania i magazynowania lub wykorzystania CO₂. Punktem kontrolnym skuteczności podjętych działań dla branży cementowo-betonowej jest osiągnięcie do 2030 roku redukcji emisji CO₂ o 40% w całym łańcuchu wartości. W ramach przedstawionej strategii 5C, już teraz można podjąć szybkie i efektywne działania pozwalające na istotne zmniejszenie emisji CO₂ w wyniku powszechniejszego stosowania cementów nisko-klinkierowych (nisko-emisyjnych) oraz optymalizacji procesu wykonywania konstrukcji poprzez zastosowanie betonów zaprojektowanych za pomocą „zielonego” podejścia. Dodatkowo, poprzez wydłużenie okresu eksploatacji konstrukcji/elementu/wyrobu poprzez zwiększenie trwałości. Trwałość odpowiada pośrednio za wpływ środowiskowy związany z eliminacją działań naprawczych i remontowych. Każdy dodatkowy proces konieczny do wydłużenia czasu eksploatacji konstrukcji betonowej wiąże się z dodatkową emisją, zużyciem materiałów i wykorzystaną energią [4].

Zasadniczą „zieloną” zmianą proponowaną przez producentów cementów jest powołanie wypieranie cementów wysokoklinkierowych, jak CEM I, przez niskoemisyjne cementy

z nieklinkierowymi składnikami głównymi. To zmiana nie tylko stricte ekologiczna, ale także zmiana jakościowa w aspekcie rosnących wymagań dotyczących trwałości czy też dodatkowych specjalnych właściwości jakie zagwarantować jedynie mogą cementy ze specjalnymi kompozycjami opartymi na składnikach nieklinkierowych.

Nowe cementy, według potocznej nomenklatury nazywane cementami z dodatkami mineralnymi, to nowe możliwości osiągnięcia efektów synergii połączenia kilku aktywnych lub inertych składników mineralnych z klinkierem portlandzkim i kreowanie rozwiązań szytych na miarę. To także, niestety, konieczność zerwania z mitem uniwersalności rozwiązań cementowych dobrych dla każdej aplikacji. Obecnie cały przemysł cementowy we współpracy ze światem naukowym powraca do rozwiązań badanych już wiele lat temu, odświeżając wiedzę odkrytą przez wielu naukowców i znajdując dla niej odpowiednie praktyczne zastosowanie [5,6].

Rozszerzający się zbiór możliwych do pozyskania na rynku rodzajów cementu, z punktu widzenia producenta betonu, który musi zapewnić zdefiniowane przez zamawiającego właściwości użytkowe (a narzucone przez projektanta konstrukcji), nie oznacza bynajmniej możliwości użycia każdego dostępnego cementu, w każdym zamierzonym zastosowaniu. Dotyczy to w szczególności odporności betonu na przewidywane oddziaływania środowiska, w którym będzie pracował, czyli określonych normą PN-EN 206 [7] w postaci klas ekspozycji.

Ograniczenia w tym zakresie zawiera rozdz. 5.1.1 normy PN-EN 206 [7], który dopuszcza do stosowania w betonie wyłącznie „*składniki o ustalonej przydatności do konkretnego założonego zastosowania betonu*”. Wprowadzie ogólną przydatność cementu uznaje się w odniesieniu do norm PN-EN 197-1 [8], PN-EN 14216 [9] oraz PN-EN 197-5 [10], ale jednoznacznie stwierdza się, że „*ustalona ogólna przydatność składnika nie oznacza jego przydatności w przypadku dowolnego założonego zastosowania betonu i dowolnego składu betonu*”. Aby zatem prawidłowo wybrać właściwy cement do konkretnego zastosowania spośród cementów o ustalonej ogólnej przydatności, norma PN-EN 206 w rozdz. 5.2.2 zaleca aby wziąć pod uwagę:

- realizację robót,
- przeznaczenie betonu,
- warunki pielęgnacji (np. obróbka cieplna),
- warunki środowiska, na którego działanie będzie narażona konstrukcja (klasy ekspozycji XC, XD, XS, XF, XA),
- potencjalną reaktywność kruszywa z alkaliami zawartymi w składnikach.

Z uwagi na konieczność zapewnienia przewidywanej w projekcie trwałości konstrukcji, w krajowym uzupełnieniu PN-B06265:2022-08 [12] ustalono w załączniku F (w tablicach F2, F3 i F4) obszary zastosowań cementów w poszczególnych klasach ekspozycji. I tak:

- tablica F2 zawiera cementy zgodne z PN-EN 197-1 [8] lub PN-B-19707 [11] lub PN-EN 197-5 [10],
- tablica F3 zawiera cementy CEM II-A,B,C-M zgodne z PN-EN 197-1 [8] lub PN-B-19707 [11] lub PN-EN 197-5 [10],
- tablica F4 zawiera cementy zgodne z PN-EN 14216 [9].

Dla cementów umieszczonych w tych tablicach (już dostępnych na rynku lub potencjalnie dostępnych) zaznaczono literą „X” akceptowalny zakres ich stosowania w danej klasie ekspozycji, oraz literą „O” wymaganie potwierdzenia przydatności takiego rodzaju cementu w danej klasie ekspozycji.

Generalne kryterium takiego podziału cementów jest efektem dotychczasowych długoletnich doświadczeń ich stosowania w poszczególnych klasach ekspozycji. Cement CEM I bezspornie dedykowany jest wszystkim rodzajom oddziaływań środowiska, natomiast im większa zawartość składników głównych innych niż klinkier i/lub większa liczba ich kombinacji, tym ograniczenia są większe.

Warto zwrócić uwagę na charakter tych ograniczeń. W poprzedniej wersji krajowego uzupełnienia (PN-B 06265:2018-10 [12]) litera „O” w tablicach załącznika F oznaczała „*brak możliwości stosowania*”, natomiast aktualna norma [13] „*wymaga potwierdzenia przydatności*”. Rezygnacja z kategoriycznego wykluczenia użycia pewnych cementów w określonych klasach ekspozycji oznacza w zasadzie możliwość użycia każdego cementu w każdych warunkach środowiskowych, pod warunkiem jednak, że zgodnie z procedurami normowymi zostanie potwierdzona przydatność w tych konkretnych zastosowaniach – na przykład metodami równoważnych właściwości betonu. Logika takiego podejścia wynika z faktu, że oznaczenie w tablicach cementu literą „O” nie wynika z ewidentnie złych doświadczeń użycia go w danym środowisku, a raczej z braku wystarczających ogólnych pozytywnych dowodów potwierdzających wymaganą trwałość betonu w konkretnych warunkach. W takim przypadku konieczne jest wtedy przeprowadzenie indywidualnego potwierdzenia wymagań dla konkretnej receptury betonu – i jest to zadanie producenta betonu w przypadku betonu projektowanego, lub właściciela receptury (np. wykonawcy robót, inwestora, dostawcy surowców, itp.) w przypadku betonu recepturowego.

Analizując modyfikacje norm zmieniające znacząco asortyment dostępnych rodzajów cementu, nie sposób nie wspomnieć również o prognozowanych zmianach w podejściu do ustalania parametrów trwałościowych na etapie projektowania. Aktualizowany obecnie Eurokod 2 [xx] wprowadza nowe zasady ustalania ochrony zbrojenia (otuliny zbrojenia) w poszczególnych klasach ekspozycji (XC1÷XC4, XS1÷XS3 oraz XD1÷XD3), w zależności od nowo wprowadzonych parametrów betonu chroniącego stal zbrojeniową, tj.:

- XRC – klasy odporności na korozję wywołaną karbonatyzacją (7 klas: XRC1÷XRC7),
- XRDS – klasy odporności na korozję wywołaną chlorkami (10 klas XRDS1÷XRDS10).

Zmiana podejścia jest dość rewolucyjna. Wydaje się z jednej strony, że precyzyjniej porządkuje wymagania związane z trwałością konstrukcji, z drugiej jednak narzuci na producentów betonu (opracowujących receptury) konieczność sklasyfikowania betonu w danej normowej klasie odporności XRC i/lub XRDS potwierdzonych badaniami wstępnymi, a później deklarowania ich jako właściwości użytkowych – oczywiście po przeprowadzeniu odpowiedniego normowego dowodu, w tym szczegółowych badań zgodności w ramach Zakładowej Kontroli Zgodności.

Rewolucyjne zmiany dopiero przed nami. Po raz pierwszy od wielu lat pojawi się norma cementowa prEN 196-6 [14] w której zostanie dodany całkiem nowy składnik główny pozaklinkierowy – F – pył z recyklingu betonu. To otwarcie całkowicie nowych dróg poszukiwań produktów cementowych bazujących na strategii zrównoważonego rozwoju i umożliwiających praktyczne i klasyczne stosowanie zasad gospodarki obiegu zamkniętego w produkcji materiałów budowlanych.

W projekcie normy prEN 197-6 zdefiniowano 6 nowych rodzajów cementu, których skład normowy oparty jest albo na założeniu samodzielnego stosowania pyłu z recyklingu betonu (F) – cementy CEM II/A-F i CEM II/B-F, albo na tworzeniu kompozycji w nowych konfiguracjach ze znanymi dodatkami mineralnymi. Takie spojrzenie na kompozycje nowych cementów pozwala na świadome gospodarowanie materiałem z recyklingu betonu

i zastosowanie takiego pyłu jako zamiennika nieaktywnego kamienia wapiennego L lub LL powszechnie stosowanego jako dodatku głównego nieklinkierowego.

2. Właściwości cementów użytych do badań z oceną możliwości ich stosowania w świetle zapisów aktualnych norm

W programie badawczym, którego wyniki są przedmiotem prezentacji, uwzględniono porównanie właściwości betonów wykonanych na cementach rodzaju CEM II/C-M zgodnych z normą PN-EN 197-5, których kompozycja została oparta na połączeniu znanych i powszechnie stosowanych oddzielne składników głównych nieklinkierowych takich jak kamień wapienny LL, granulowany żużel wielkopiecowy - S, popiół lotny krzemionkowy - V oraz stosunkowo mało znanego składnika popiołu lotnego wapiennego - W. Cementem odniesienia w testach porównawczych był cement CEM II/B-V o kompozycji zgodnej z normą PN-EN 197-1. Podstawowe właściwości cementów zostały zaprezentowane w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe właściwości cementów wykorzystanych w badaniach

Właściwość	Jednostka	CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	CEM II/B-V 32,5 R
Początek wiązania	min	290	150	330	220
Koniec wiązania	min	350	245	390	280
Wодоzゑdnořć	%	29,0	30,0	29,2	31,0
Powierzchnia właściwa	cm ² /g	5420	4630	5230	4330
Wytrzymałość na ściskanie:					
po 2 dniach	MPa	14,6	20,8	14,1	16,7
po 28 dniach	MPa	46,6	50,0	43,5	40,2
Zawartość klinkieru (K)	%	50-64	50-64	50-64	65-79

Analizując możliwe obszary zastosowań tych cementów do betonu w zależności od środowiska użytkowania (PN-B 06265 tablica F1 dla CEM II/B-V i tablica F2 dla CEM II/C) wyraźnie zaznacza się ilość ograniczeń związanych z zastosowaniem nowych cementów C-M w odniesieniu do cementu CEM II/B-V (tab. 2).

Tabela 2. Obszary możliwych zastosowań cementów wykorzystanych w badaniach wg PN-B-06265:2022-08

Rodzaj cementu	Odziaływanie korozyjne					
	XC	XS	XD	XF	XA	XM
CEM II/B-V	XC1 do XC4	XS1-XS3	XD1-XD3	XF1-XF2	XA1-XA3	XM1-XM3
CEM II/C-M (V-LL)	XC1 do XC2	XS1	XD1	XF1	XA1-XA3	-
CEM II/C-M (S-LL)	XC1 do XC2	XS1	XD1	XF1	XA1-XA3	XM1
CEM II/C-M (W-LL)	XC1 do XC2	-	-	-	-	-

To skłoniło autorów niniejszego artykułu do próby odpowiedzi na pytanie czy jest możliwe rozszerzenie możliwości aplikacji nowych cementów na podstawie uzyskanych wyników badań najpierw podstawowych (wytrzymałość na ściskanie), a później z wybranym aspektem trwałościowym.

3. Program badań oraz uzyskane wyniki w zakresie podstawowych właściwości betonów z cementami CEM II/C-M vs. referencyjny beton z cementem CEM II/B-V

W pierwszym etapie prowadzonych badań zostały wykonane betony, zaprojektowane pod kątem zastosowania w klasach ekspozycji od XC1 do XC4 z zachowaniem podanych w Tablicy F1 normy PN-B 06265:2022-08 wartości granicznych dotyczących:

- minimalnej zawartości cementu (tab.3);
- maksymalnej wielkości współczynnika wodno-cementowego (tab. 3).

Tabela 3. Wartości graniczne dotyczące składu dla wykonanych betonów wg PN-B-06265:2022-08

Klasa ekspozycji	Minimalna klasa wytrzymałości	max. w/c	min. zawartość cementu [kg/m ³]
XC1	C16/20	0,70	260
XC2	C16/20	0,65	280
XC3	C20/25	0,60	280
XC4	C 25/30	0,55	300

Składy betonów zostały dobrane w sposób umożliwiający ich porównanie, tj. zastosowano taki sam stos okruszowy we wszystkich klasach ekspozycji oraz użyto domieszki upłynniającej umożliwiającej uzyskanie konsystencji mierzonej opadem stożka w przedziale 150 ± 20 mm i nie powodującej wzrostu zawartości powietrza mieszanki powyżej 3,0%.

Betony wykonane zgodnie z powyższymi założeniami zostały poddane badaniom podstawowym obejmującym:

- rozwój wytrzymałości na ściskanie w terminach 2, 7, 28 i 56 dni dojrzewania
- głębokość penetracji wody pod ciśnieniem – po 28 dniach dojrzewania.

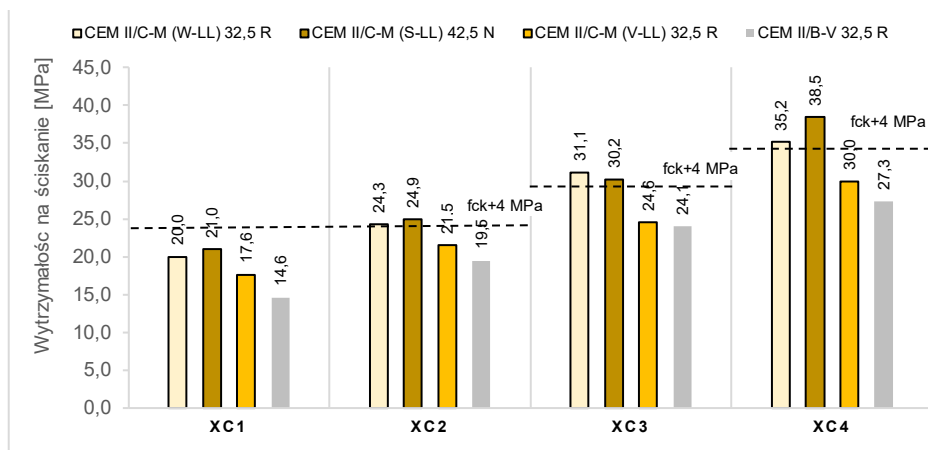
3.1. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wykonanych betonów

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie badanych betonów w zależności od klas ekspozycji zostały zaprezentowane w tabeli 4.

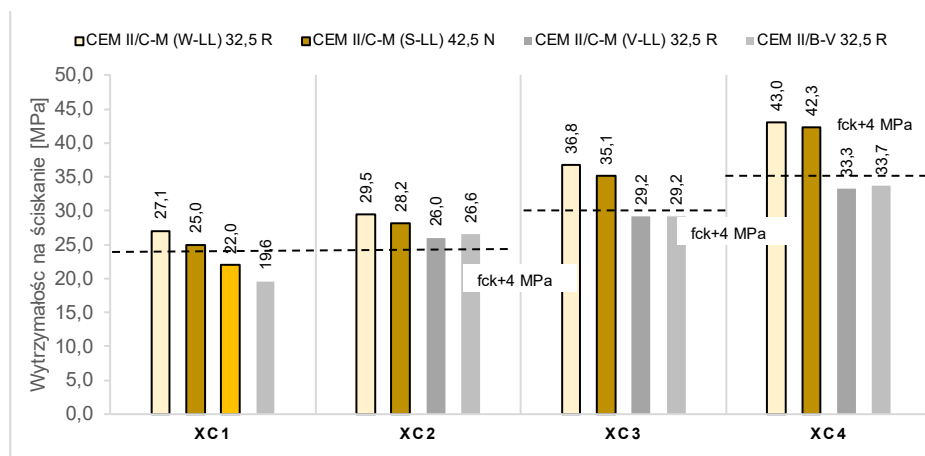
Tabela 4. Zestawie wyników badań wytrzymałości na ściskanie wykonanych betonów

Klasa ekspozycji	Klasa wytrzymałości	Rodzaj cementu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			
			f_{c_2}	f_{c_7}	$f_{c_{28}}$	$f_{c_{56}}$
XC1	C16/20	CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	4,8	11,4	20,0	27,1
XC1	C16/20	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	6,5	13,0	21,0	25,0
XC1	C16/20	CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R	2,4	10,1	17,6	22,0
XC1	C16/20	CEM II/B-V 32,5 R	5,3	9,4	14,6	19,6
XC2	C16/20	CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	5,1	13,6	24,3	29,5
XC2	C16/20	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	8,3	15,3	24,9	28,2
XC2	C16/20	CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R	2,7	12,2	21,5	26,0
XC2	C16/20	CEM II/B-V 32,5 R	6,6	11,4	19,5	26,6
XC3	C20/25	CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	7,1	18,3	31,1	36,8
XC3	C20/25	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	10,3	19,0	30,2	35,1
XC3	C20/25	CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R	3,9	16,1	24,6	29,2
XC3	C20/25	CEM II/B-V 32,5 R	8,5	15,2	24,1	29,2
XC4	C25/30	CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	8,9	21,3	35,2	43,0
XC4	C25/30	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	12,6	24,3	38,5	42,3
XC4	C25/30	CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R	5,5	18,3	30,0	33,3
XC4	C25/30	CEM II/B-V 32,5 R	9,3	17,9	27,3	33,7

W celu zobrazowania wartości osiąganych wytrzymałości po 28 i 56 dniach, uzyskane wyniki w zależności od klasy ekspozycji i rodzaju użytego cementu zostały przedstawione na rys. 1 i rys. 2.



Rys. 1. Porównanie wytrzymałości na ściskanie betonów po 28 dniach



Rys. 2. Porównanie wytrzymałości na ściskanie betonów po 56 dniach

Analizując uzyskane wyniki badań i oceniając spełnienie wymaganej klasy wytrzymałości w zależności od projektowanego obszaru aplikacji od XC1 od XC4 można stwierdzić, że dla badanych serii betonów po 28 dniach wymaganą klasę wytrzymałości uzyskano dla betonów:

- XC2 – XC4 przy zastosowaniu cementu CEM II/C-M (W-LL) oraz CEM II/C-M (S-LL)

W pozostałych przypadkach analizę przeprowadzono po 56 dniach dojrzewania betonów. Oceny wyników zaprezentowano w tabeli 5.

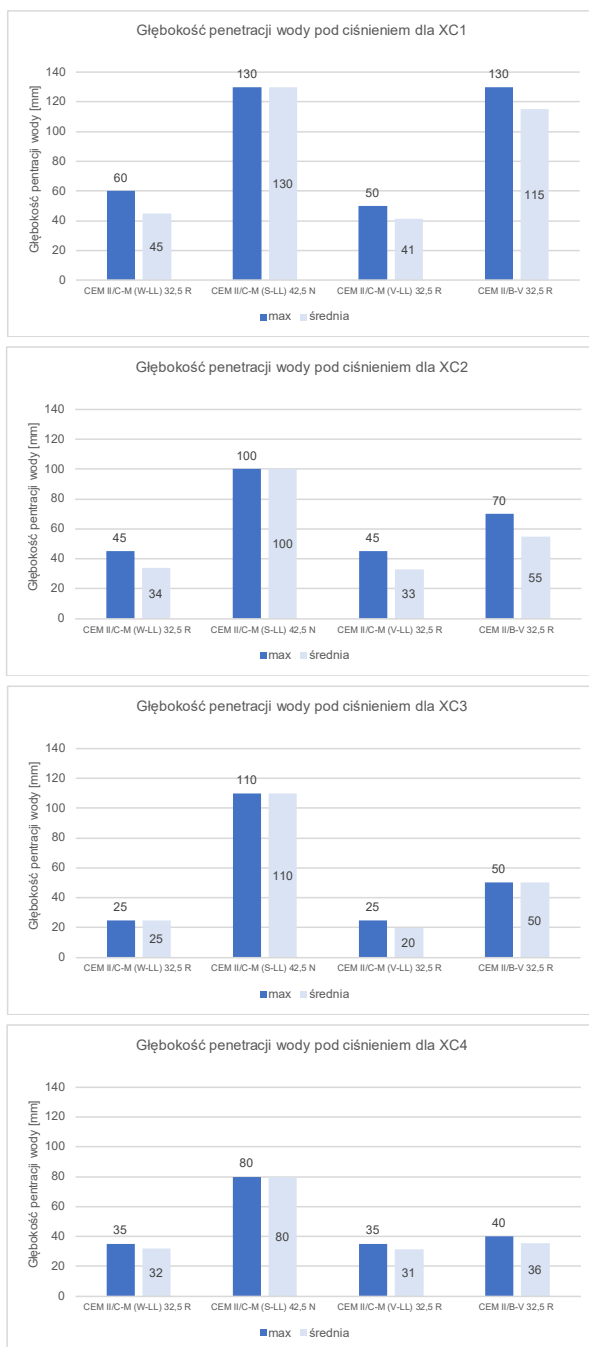
Tabela 5. Ocena wytrzymałości na ściskanie po 56 dniach dojrzewania w świetle kryteriów min. klasy wytrzymałości dla betonów przypisanym poszczególnym klasom ekspozycji

Klasa ekspozycji	Minimalna klasa wytrzymałości	CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	CEM II/C-M (V-LL) 32,5 R	CEM II/B-V 32,5 R
XC1	C16/20	TAK	TAK	NIE	NIE
XC2	C16/20	TAK	TAK	TAK	TAK
XC3	C20/25	TAK	TAK	TAK	TAK
XC4	C 25/30	TAK	TAK	NIE	NIE

W przypadku betonów wykonanych na cementach CEM II/C-M (V-LL) oraz CEM II/B-V po 56 dniach dojrzewania nie uzyskano wymaganej tablicą F1 klasy wytrzymałości dla aplikacji w klasach ekspozycji XC1 oraz XC4. Wynika z tego, że przy takich wytrzymałościach stosowanego cementu okres oceny należy wydłużyć do minimum 90 dni lub stosować betony o większej niż minimalna ilość cementu i/lub mniejszej niż maksymalna wielkość w/c.

3.2. Wyniki badań głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wykonanych betonów

Zgodnie z planem badawczym przeprowadzono badania głębokości penetracji wody pod ciśnieniem [22] dla betonów we wszystkich klasach ekspozycji do XC1 do XC4 po 28 dniach twardnienia. Wyniki badań pomiarów głębokości wniknięcia wody (maksymalnej i średniej dla 3 próbek) zaprezentowano na rys. 3.



Rys. 3. Wyniki badań głębokości penetracji wody pod ciśnieniem.

3.3. Wyniki badań szybkości karbonatyzacji dla wybranych betonów

O ile badanie wytrzymałości na ściskanie jest badaniem standardowo przyjętym do oceny betonu, to dopiero wykonanie dodatkowych badań miało pozwolić na określenie przydatności i możliwości aplikacji nowych cementów do klas ekspozycji związanych z oddziaływaniem dwutlenku węgla na beton w różnych warunkach wilgotnościowych eksploatacji. Do badań odporności na karbonatyzację wytypowano próbki z betonów wykonanych z zastosowaniem cementów CEM II/C-M(W-LL) 32,5R oraz CEM II/B-V 32,5R: dla klas ekspozycji XC2 – potwierdzenie założeń zapisów normy PN-B 06265 tablica F2 oraz wykonanych dla klas ekspozycji XC4.

Jako definicję karbonatyzacji można przyjąć, że jest to proces zmian fizyko-chemicznych stwardniałego zaczynu cementowego w wyniku oddziaływania CO_2 . W wyniku karbonatyzacji powstaje głównie węglan wapnia CaCO_3 , konsekwencją czego jest obniżenie pH betonu wpływające na trwałość konstrukcji żelbetonowych w efekcie zmniejszenia własności ochronnych stali zbrojeniowej przed korozją.

Do oceny potencjalnej odporności betonu na karbonatyzację wykorzystano procedurę normową PN-EN 12390-12 [23] polegającą na ocenie głębokości karbonatyzacji (zmiany pH betonu) w próbkach poddanych oddziaływaniu CO_2 o stężeniu 3% w ustalonych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych (wilgotność $\text{RH}=60\%$ oraz temperatura 20°C) przez okres 70 dni, wykorzystując także możliwość badań w terminach pośrednich czyli po 7 i 28 dniach. Jako wskaźnika do oceny grubości strefy skarbonatyzowanej użyto fenoloftaleiny. Naniesienie tego odczynnika na powierzchnię świeżego przełamu betonu powoduje zabarwienie betonu nieskarbonatyzowanego na kolor fioletowy. Warstwa betonu skarbonatyzowanego nie ulega zabarwieniu. Jako graniczną wielkość rozdzielającą obie fazy betonu przyjmuje się $\text{pH} \sim 8,5$ do $9,0$ [14]. Zdjęcia próbek świadków po 70 dniach ekspozycji betonów w komorze z CO_2 , o składzie spełniającym minimalne kryteria klasy ekspozycji XC2 oraz XC4 z użyciem cementów CEM II/B-V i CEM II/C-M(W-LL) zaprezentowano na rysunkach 4 i 5.



CEM II/B-V 32,5 R

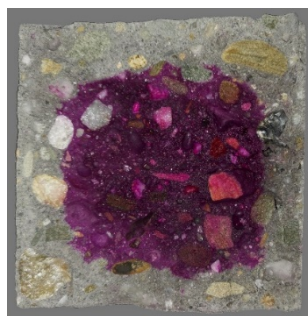


CEM II/C-M(W-LL) 32,5 R

Rys. 4. Widok próbek betonów klasy ekspozycji XC2 po badaniu odporności na karbonatyzację



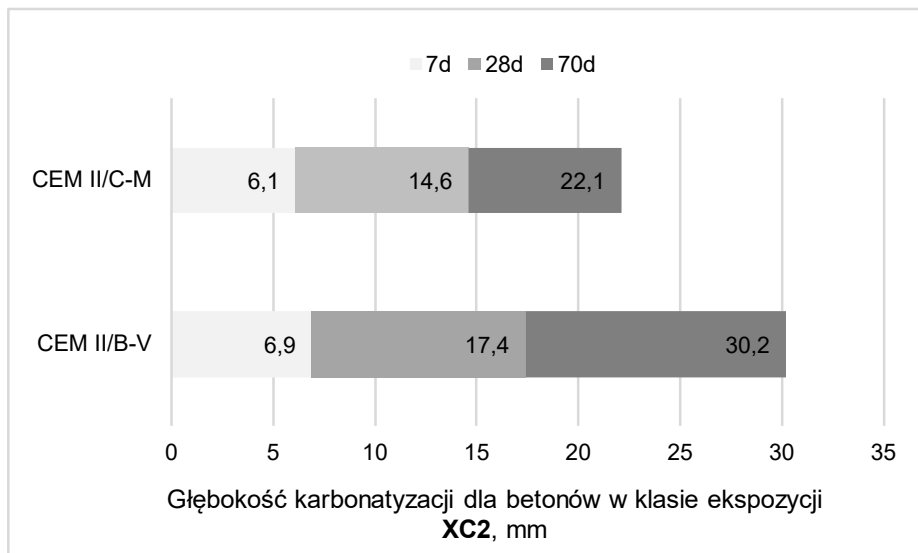
CEM II/B-V 32,5 R



CEM II/C-M(W-LL) 32,5 R

Rys. 5. Widok próbek betonów klasy ekspozycji XC4 po badaniu odporności na karbonatyzację

Analiza zestawień zaprezentowanych na rys. 6 i 7 dotyczących wyników badań szybkości karbonatyzacji betonów klasy ekspozycji XC2 pozwala stwierdzić, że szybkość procesu karbonatyzacji w pierwszych 7 dniach zdaje się być zbliżona, jednak wyniki 28-mio i 70-cio dniowe wskazują na znacznie większą szybkość procesu karbonatyzacji betonu wykonanego w oparciu o cement CEM II/B-V. Jeśli dla porównania przyjąć wyznaczone wielkości stałych szybkości karbonatyzacji K_{AC} , szybkość karbonatyzacji betonu wykonanego w oparciu o CEM II/B-V jest większa o ok. 35%.

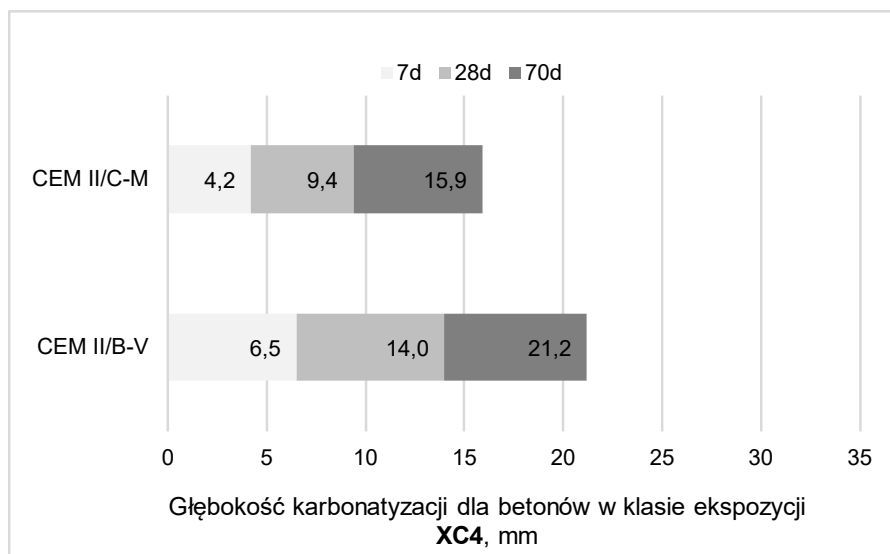
Rys. 6. Zestawienie głębokości karbonatyzacji betonów wykonanych na CEM II/B-V oraz CEM II/C-M(W-LL), spełniających kryteria składu dla klasy ekspozycji XC2 po 7, 28 i 70 dniach oddziaływania CO_2



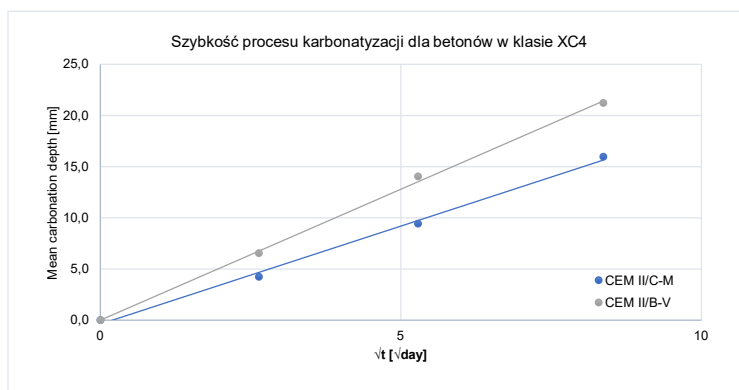
Skład dla klasy ekspozycji - rodzaj cementu	Stała szybkości karbonatyzacji K_{AC} [mm·d ^{-0,5}]
XC2 - CEM II/B-V 32,5R	3,66
XC2 - CEM II/C(W-LL) 32,5R	2,69

Rys. 7. Porównanie szybkości przebiegu procesu karbonatyzacji betonów w klasie ekspozycji XC2 oraz wyznaczonych w oparciu o uzyskane wyniki stałych szybkości karbonatyzacji K_{AC} [mm·d^{-0,5}].

Analiza zmian głębokości karbonatyzacji betonów spełniających ilościowe kryteria składu dla klasy ekspozycji XC4 (rys.8 i 9) potwierdzają wyniki uzyskane dla betonów klasy XC2 dotyczące różnic w wielkościach wyznaczonych stałych szybkości karbonatyzacji. Co do zasady, wielkość stałej szybkości karbonatyzacji jest o ponad 30% większa w przypadku użycia cementu CEM II/B-V 32,5R niż cementu CEM II/C(W-LL) 32,5R. Przewidywany w przypadku klasy ekspozycji wyższy udział cementu w składzie betonu oraz niższa wielkość współczynnika w/c niż w klasie ekspozycji XC2 skutkuje uzyskaniem niższych wielkości stałych szybkości niż betonów spełniających ilościowe kryteria składu dla klasy ekspozycji XC2. Wyraźnie wskazują to również mniejsze wartości głębokości skarbonatyzowanego betonu po przyjętych w procedurze badawczej czasach pomiaru. Należy w tym miejscu nadmienić, że beton odniesienia wykonany z użyciem cementu CEM II/B-V 32,5R, w warunkach rzeczywistych, a zatem spełnienia wszystkich kryteriów wskazanych przez normę PN-B-06265, a zatem i klasy wytrzymałości (np. po korekcie w/c do wielkości mniejszej od granicznej przyjętej dla określonej klasy ekspozycji o 0,02), wykazywałby nieco korzystniejsze, a zatem mniejsze wielkości głębokości karbonatyzacji oraz mniejszą wartość stałej szybkości karbonatyzacji. Z uwagi jednak na stosunkowo niewielki „brak” wytrzymałości po 56 d w stosunku do wielkości oczekiwanej (0,3 MPa), możliwy do skorygowania niewielką zmianą współczynnika w/c i/lub ilością cementu CEM II/B-V, można się spodziewać, że stwierdzony trend różnic wyników badań między seriami wykonanymi w oparciu o CEM II/C-M(W-LL) i CEM II/B-V zostanie zachowany, a zmiany wielkości głębokości karbonatyzacji, a co za tym idzie również i szybkości karbonatyzacji ulegną zmniejszeniu, jednak w stopniu niezbyt znaczącym.



Rys. 8. Zestawienie głębokości karbonatyzacji betonów wykonanych na CEM II/B-V oraz CEM II/C-M(W-LL), spełniających kryteria składu dla klasy ekspozycji XC4 po 7, 28 i 70 dniach oddziaływania CO_2 .



Skład dla klasy ekspozycji - rodzaj cementu	Stała szybkości karbonatyzacji K_{AC} [mm·d ^{-0,5}]
XC4 - CEM II/B-V 32,5R	2,56
XC4 - CEM II/C(W-LL) 32,5R	1,92

Rys. 9. Porównanie szybkości przebiegu procesu karbonatyzacji betonów w klasie ekspozycji XC4 oraz wyznaczonych w oparciu o uzyskane wyniki stałych szybkości karbonatyzacji K_{AC} [mm·d^{-0,5}].

4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań wskazują, że dla badanych betonów opartych na nowym cemencie CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R jest możliwe osiągnięcie wielkości kluczowych właściwości wyższych niż w przypadku betonów wykonanych z cementem CEM II/B-V 32,5 R.

W wyniku analiz porównawczych właściwości użytkowych dla zakładanych właściwości porównywanych betonów ustalono, że betony wykonane na cemencie CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R charakteryzują się:

- wyższą wytrzymałością na ściskanie w każdym z badanych terminów 7, 28 i 56 dni
- wyższą szczelnością wyrażoną głębokością penetracji wody pod ciśnieniem
- lepszą odpornością na karbonatyzację określoną za pomocą pomiarów szybkości postępowania procesu karbonatyzacji oraz głębokości skarbonatyzowanej strefy.

Na potwierdzenie powyższych stwierdzeń zestawiono wyniki badań wskazanych wyżej właściwości w formie tablicy 7.

Tablica 7. Porównanie badanych właściwości betonów

Kryterium oceny	Cement odniesienia CEM II/B-V 32,5 R	Cement badany CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R
Wytrzymałość na ściskanie		
C16/20 XC1	$f_{ck}+4\text{MPa}$ (po 56d)	$f_{ck}+4\text{MPa}$ (po 56d)
C16/20 XC2	$f_{ck}+4\text{MPa}$ (po 56d)	$f_{ck}+4\text{MPa}$ (po 28d)
C20/25 XC3	$f_{ck}+4\text{MPa}$ (po 56d)	$f_{ck}+4\text{MPa}$ (po 28d)
C25/30 XC4	$f_{ck}+4\text{MPa}$ (po 56d)	$f_{ck}+4\text{MPa}$ (po 28d)
Głębokość penetracji wody [max]		
C16/20 XC1	130 mm	60 mm
C16/20 XC2	70 mm	45 mm
C20/25 XC3	50 mm	25 mm
C25/30 XC4	40 mm	35 mm
Głębokość i szybkość karbonatyzacji		
C16/20 XC2	30,2 mm / $3,66 \text{ mm} \cdot d^{-0,5}$	22,1 mm / $2,69 \text{ mm} \cdot d^{-0,5}$
C25/30 XC4	21,2 mm / $2,56 \text{ mm} \cdot d^{-0,5}$	15,9 mm / $1,92 \text{ mm} \cdot d^{-0,5}$

Na podstawie uzyskanych wyników badań można postawić tezę, że betony wykonane na cemencie CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R z uwzględnieniem zaleceń normowych co do granicznych wartości składu betonów, mogą być stosowane do klas ekspozycji od XC1 do XC4 czyli takich samych jak wykonane betony na cemencie referencyjnym CEM II/B-

-V 32,5 R. Dodatkową zaletą nowego cementu w odniesieniu do cementu referencyjnego jest ograniczenie wielkości emisji CO₂ o 10% %, związane głównie ze zmianą udziału procentowego klinkieru [28, 29].

Literatura

- [1] 2020 Global Status Report for Buildings and Construction / Statist
- [2] Środa B., Cementy niskoklinkierowe – terazniejszość i skomplikowana przyszłość, BTA 1(97)/2022
- [3] Środa B., Cementy niskoklinkierowe – terazniejszość i skomplikowana przyszłość, SPC-CEMBURE-AU-2050-Roadmap_pl
- [4] Górak P., Chładzyński S., Walusiak K. Cementy niskoemisyjne w suchych mieszankach chemii budowlanej - zielony kierunek rozwoju. Izolacje 5/2022
- [5] Beton. Technologie i metody badań. Praca zbiorowa, redakcja naukowa prof. Jan Deja, Kraków 2020.
- [6] Kurdowski W. Chemia cementu i betonu rok wydania: 2010, ISBN: 978-83-91315-24-8
- [7] prEN 196-7:2022 „Cement – Part 6: Cement with recycled building materials
- [8] Golda A, Górak P., Juszczak T., Sok Heng S. Badanie betonu w konstrukcji w świetle aktualnych norm i wytycznych . SPBT w Polsce, ISBN 978-83-927207-2-0.
- [9] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność.
- [10] PN-B-06565:2022-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08
- [11] PN-B-06565:2018-10 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12
- [12] PN-EN 197-1:2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [13] PN-EN 14216:2015-09 Cement. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów specjalnych o bardzo niskim cieple hydratacji
- [14] PN-EN 197-5:2021-5 Cement. Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI
- [15] PN-B-19707:2013-10 Cement. Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności
- [16] Fpr EN 1992-1-1: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules – Rules for buildings, bridges and civil engineering structures
- [17] CEN/TR 16639:2014 Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept
- [18] PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- [19] PN-EN 13263-1+A1:2010 Pył krzemionkowy. Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności
- [20] PN-EN 15167-1:2007 Mielony granulowany żużel wielkopiecowy do stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- [21] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu
- [22] PN-EN 12390-8:2011 Badania betonu - Część 8 Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem
- [23] PN-EN 12390-12:2020-06 – wersja angielska Badania betonu – Część 12: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację – Przyspieszona metoda karbonatyzacji
- [24] PN-EN 12350-1:2011 Badanie mieszanki betonowej – Część 1: Pobieranie próbek
- [25] PN-EN 12350-7:2011 Badanie mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.
- [26] PN-EN 12390-2:2011 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
- [27] PN-EN 12390-3:2009 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania
- [28] Deklaracja Środowiskowa III Typu - EPD ITB No. 420/2023
- [29] Deklaracja Środowiskowa III Typu - EPD ITB No. 239/2023

