

dr inż. Grzegorz Bajorek, prof. PRz
Politechnika Rzeszowska
Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji
mgr inż. Michał Drabczyk
mgr inż. Justyna Nowicka-Semen
Holcim Polska S.A, Dział Jakości i Rozwoju

Porównanie wpływu cementów ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA i CEM II/B-V 42,5 R - HSR na trwałość elementów żelbetowych.

Abstrakt

Artykuł zawiera analizę możliwości stosowania cementu niskoemisyjnego ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA z Holcim w betonach odpornych na korozję spowodowaną karbonatyzacją i chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej (klasa ekspozycji XC4, XD1), wg PN-EN 206. Przedstawiono w nim wyniki badań przeprowadzonych zgodnie z aktualnymi normami, ich analizę oraz wnioski, które potwierdzają równoważne właściwości betonów na bazie cementu niskoemisyjnego z właściwościami betonów na bazie cementu CEM II/B-V 42,5R HSR.

Słowa kluczowe: beton, trwałość, wytrzymałość na ściskanie, karbonatyzacja, migracja jonów chlorkowych, konstrukcja żelbetowa

1. Wprowadzenie

Wybór właściwego materiału konstrukcyjnego podyktowany jest przede wszystkim koniecznością osiągnięcia wyspecyfikowanych właściwości wytrzymałościowych i trwałościowych konstrukcji w wymaganym czasie. W przypadku betonu, będącego jednym z najpopularniejszych wyrobów budowlanych, dobór odpowiednich właściwości oraz składników, które umożliwią osiągnięcie stawianych wymagań, w sposób nadrzędny jest zdefiniowany w normach PN-EN 206+A2:2021-08 oraz PN-B-06265. Dostosowanie do wymagań tych norm, odkąd beton stał się wyrobem budowlanym, jest obowiązkiem każdego producenta betonu towarowego. Zapisy obu wymienionych dokumentów ograniczają zastosowanie niektórych typów cementów niskoemisyjnych w określonych klasach ekspozycji. Mimo to, obecne trendy spoiwowe zorientowane są na cementy niskoemisyjne i dodatki mineralne m.in. ze względu na konieczność ograniczenia dotychczasowej emisji CO₂, a przede wszystkim wskaźnika klinkier/cement do poziomu 0,60 w 2050 r. [1]. W ostatnim czasie

powstało wiele prac badawczych i opracowań tematycznych zarówno polskich [1÷3], jak i zagranicznych [4÷6], dotyczących wpływu zastosowania spoiw niskoemisyjnych na trwałość konstrukcji betonowych oraz kierunku ich rozwoju. Celem wykonanych przez badaczy analiz była przede wszystkim ocena właściwości betonów z zastosowaniem cementów niskoemisyjnych i wytypowanie rozwiązań, które ostatecznie wpłynęłyby na zachowanie lub też polepszenie właściwości użytkowych konstrukcji. Kontynuując ten trend, w artykule podjęto próbę oceny użyteczności cementu ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N-LH/HSR/NA w klasach ekspozycji XC4 i XD1. Zaprezentowane wnioski wynikają bezpośrednio z porównania wyników badań betonów testowych z wynikami betonu referencyjnego oraz z analizy statystycznej w ramach koncepcji równoważnych właściwości użytkowych [7]. Kombinacja wymienionych elementów przeprowadzonej oceny pozwoliła w sposób dokładny wskazać, iż analizowane betony charakteryzują się porównywalną odpornością na niszczące działanie środowiska w porównaniu z betonem referencyjnym. Następnym takim podejściem jest niewątpliwie wiele korzyści dla producentów betonu towarowego, takich jak: ograniczenie śladu węglowego (emisji CO₂), a tym samym troska o środowisko, a także ujednolicenie produkcji pod kątem rodzaju stosowanego cementu oraz ograniczenie kosztów produkcji.

2. Charakterystyka badań i analizowanych cementów

Celem przeprowadzonych badań była analiza trwałości betonów wykonanych z użyciem cementu niskoemisyjnego ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N-LH/HSR/NA i porównanie uzyskanych wyników z właściwościami betonu referencyjnego na bazie cementem CEM II/B-V 42,5 R HSR. Zastosowany cement ECOPlanet 5A charakteryzuje się (zgodnie z PN-EN 197-1:2012 [9]) zmniejszoną zawartością klinkieru do 40-64%, a także zwiększoną zawartością składników głównych: popiołu lotnego krzemionkowy (V) i granulowanego żużla wielkopiecowego (S). Aby właściwie oznaczyć właściwości wpływające na trwałość betonu, przeprowadzono analizę:

- odporności mechanicznej, wykonując badanie wytrzymałości na ściskanie wg normy PN-EN 12390-3:2019-7 [10];
- odporności na korozję spowodowaną karbonatyzacją (XC), wykonując badanie odporności na karbonatyzację metodą przyśpieszoną wg normy PN-EN 12390-12:2020-06 [11];

- odporności na korozję spowodowaną chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej (XD) wykonując oznaczenie współczynnika migracji jonów chlorkowych wg normy PN-EN 12390-18 [12].

Na podstawie wyników badania wytrzymałości na ściskanie dokonano oceny betonu w odniesieniu do projektowanej klasy wytrzymałości, stosując kryteria akceptacji badań wstępnych wg załącznika A normy PN-EN 206 [7]. W odniesieniu do głębokości karbonatyzacji oraz współczynnika migracji jonów chlorkowych przeprowadzono analizę statystyczną w ramach koncepcji równoważnych właściwości użytkowych, dzięki czemu oznaczono wpływ zmniejszonej ilości klinkieru i zwiększonej ilości niskoemisyjnych składników głównych w cemencie na szczelność betonu.

3. Trwałość betonów z cementami niskoemisyjnymi

Trwałość betonu wbudowanego w konstrukcję można z powodzeniem utożsamić z zachowaniem właściwości użytkowych całej konstrukcji w projektowanym czasie użytkowania. O utracie trwałości konstrukcji żelbetowych mówi się, gdy zidentyfikowane zostanie zagrożenie korozją zbrojenia, a więc kiedy wysokoalkaliczny odczyn betonu, zapewniający ochronę zbrojenia, będzie zubożniony przez proces karbonatyzacji postępujący w głąb konstrukcji. W momencie obniżenia odczynu pH betonu poniżej 11,8 ochronna warstwa pasywacyjna stali staje się nietrwała, co stwarza wysokie ryzyko rozwoju jej korozji. Dodatkowo obecność jonów chlorkowych przyspiesza ten proces oraz, w zależności od ich stężenia, powoduje jego rozpoczęcie często przy pH większym niż 11,8. Zagrożenie to wymusza na producentach cementu, domieszek chemicznych i samego betonu poszukiwanie rozwiązań, które wzmocnią odporność betonu na wnikanie CO_2 i jonów chlorkowych. Częstym rozwiązaniem jest wzbogacanie betonów o dodatki typu II, które zwiększają jego szczelność. W omawianym projekcie badawczym mieszanki były zaprojektowane zgodnie z wymaganiami dotyczącymi składu przy kombinacji klas ekspozycji XC4 i XD1. Każda z nich wykonana została przy stałym udziale poszczególnych frakcji kruszyw oraz stałej zawartości cementu i niezmiennym wskaźniku wodno – cementowym w poszczególnych klasach ekspozycji.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań mieszanek betonowych. Badane mieszanki mieściły się w założonym zakresie klas konsystencji S3 i S4, a zawartości powietrza były mniejsze niż 3,5%.

Tab. 1. Właściwości badanych świeżych mieszanek betonowych.

Tab. 1. Properties of tested fresh concrete mixtures.

	Mieszanka referencyjna	Mieszanka testowa
Rodzaj cementu	CEM II/B-V 42,5 R - HSR	CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA
Oznaczenie betonu - Klasy ekspozycji	R2 - XC4, XD1	TD2- XC4, XD1
Konsystencja - opad stożka [mm] po czasie 10 min	150	155
Zawartość powietrza [%]	2,0	2,4

3.1. Rozwój wytrzymałości na ściskanie betonów z cementami ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA i CEM II/B-V 42,5 R - HSR

Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie wykonano na próbkach dojrzewających 28 i 56 dni w wodzie w temperaturze $20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wyniki wytrzymałości na ściskanie analizowanych betonów.

Tab. 2. Result of the compressive strength of the analyzed concretes.

	Mieszanka referencyjna	Mieszanka testowa
Rodzaj cementu	CEM II/B-V 42,5 R - HSR	CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA
Oznaczenie betonu - Klasy ekspozycji	R2 - XC4, XD1	TD2- XC4, XD1
Wymagana minimalna klasa wytrzymałości na ściskanie	C30/37	C30/37
Średnia wytrzymałość na ściskanie - 28 dni [MPa]	43,0	39,7
Średnia wytrzymałość na ściskanie - 56 dni [MPa]	52,5	48,7

Jako kryterium akceptacji dla wymaganej klasy wytrzymałości betonu przyjęto osiągnięcie wartości $f_{ck} + 6 \text{ MPa}$, jak w przypadku badań wstępnych (zał. A normy PN-EN 206 [1]).

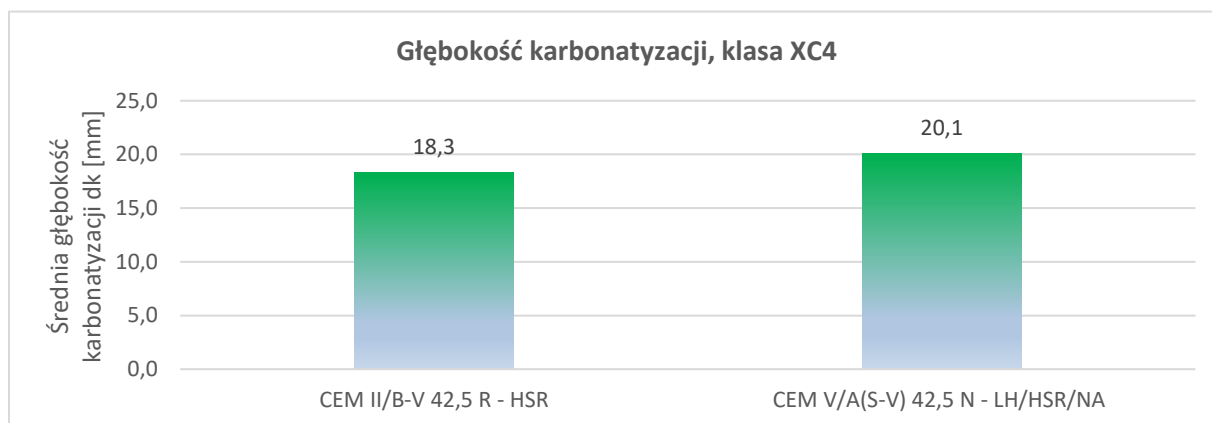
Zgodnie z tym stwierdzono, iż beton referencyjny osiągnął wyspecyfikowaną klasę wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania, natomiast beton testowy z cementem ECOPlanet 5A CEM V/A(S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA (TD2) spełnił zakładane kryterium dla klasy wytrzymałości C30/37 po 56 dniach dojrzewania betonu, a to oznacza konieczność ustalenia dla niego terminu oceny i deklarowania zgodności po 56 dniach dojrzewania.

3.2. Wyniki badań karbonatyzacji betonów z ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA i CEM II/B-V 42,5 R - HSR

Badanie karbonatyzacji rozpoczęto po 56 dniach dojrzewania betonu w wodzie w temperaturze $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ i 14 dniach kondycjonowania w warunkach laboratoryjnych,

powietrzno-suchych, zgodnie z normą badawczą [11]. Ocena porównawcza trwałości analizowanych betonów uwzględniała średnią głębokość czoła karbonatyzacji (d_k) uzyskaną po 70 dniach badania w komorze, w temperaturze $20\pm 2^\circ\text{C}$, wilgotności względnej $57\pm 3\%$ i stężeniu CO_2 równym $3,0\pm 0,5\%$.

Na rysunku 1 zestawiono wyniki z przeprowadzonego badania karbonatyzacji dla analizowanych betonów.



Rys. 1. Średnia głębokość karbonatyzacji d_k [mm] w badanych betonach, oznaczona po 56 dniach dojrzewania dla klasy ekspozycji XC4.

Fig.1. The average depth of carbonation d_k [mm] in the tested concretes, determined after 56 days for the exposure class XC4.

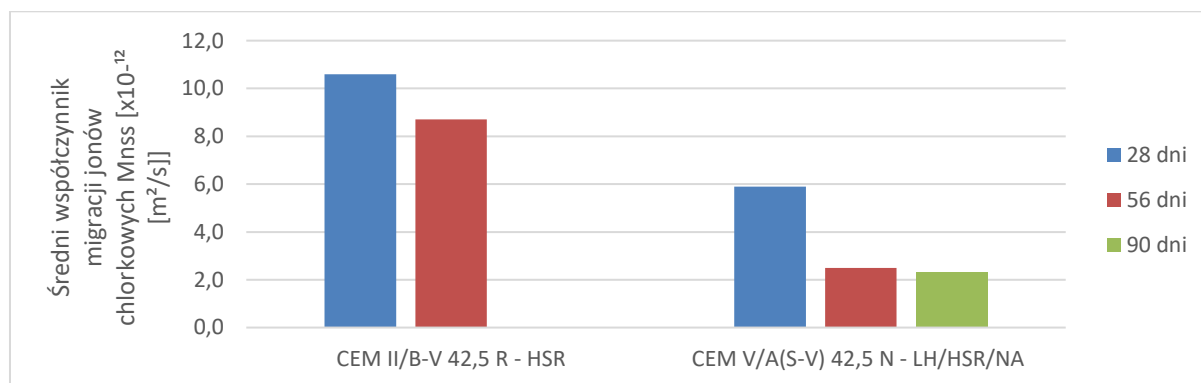
Czoło karbonatyzacji betonów z ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA miało większy zasięg niż w betonach na bazie cementu CEM II/B-V 42,5 R - HSR, ale różnica głębokości w stosunku do betonu referencyjnego wyniosła tylko 1,8 mm. Można zatem stwierdzić, że zastosowanie cementu typu ECOPlanet 5A nie wymusza zwiększenia otuliny zbrojenia w przyjmowanych klasach ekspozycji.

3.3. Wyniki badań migracji jonów chlorkowych betonów z ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA i CEM II/B-V 42,5 R - HSR

Badanie niestacjonarnej migracji jonów chlorkowych wykonano w przypadku dojrzewania w wodzie: wszystkich analizowanych składów po 28 i 56 dniach oraz dodatkowo betonu z ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA po 90 dniach. Do badania wykorzystano po 3 próbki walcowe, dostosowane do wymiarów $d=100$ mm i $h=50\pm 2$ mm. Badanie trwało od 24 do 96h, przy stałym napięciu równym 30V. Ocena porównawcza trwałości analizowanych betonów uwzględniała średni współczynnik migracji jonów chlorkowych wyznaczony z uwzględnieniem średniej głębokości penetracji jonów chlorkowych, średniej temperatury obu

roztworów testowych podczas badania, wartości przyłożonego napięcia, wysokości próbki i czasu trwania testu.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań. Dodatkowo wyznaczono wskaźnik AF (ageing factor) betonu z ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA, który wskazuje jaki wpływ na wielkość migracji jonów chlorkowych ma czas dojrzewania próbek.

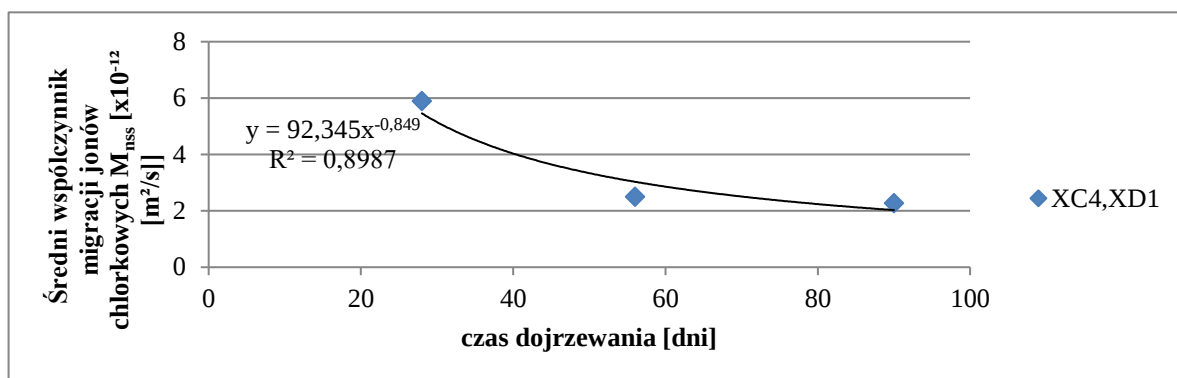


Rys.2. Porównanie współczynników migracji jonów chlorkowych dla analizowanych betonów w różnym czasie dojrzewania (28, 56 i 90 dni).

Fig. 2. Comparison of migration coefficients of chloride ions for the analyzed concretes at different ages (28, 56 and 90 days).

Wymiana cementu w stosunku 1:1 w betonach dojrzewających 28 dni, wpłynęła znacznie na obniżenie współczynnika migracji jonów chlorkowych w betonach z ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA w porównaniu z betonem referencyjnym na CEM II/B-V 42,5 R - HSR. Po 56 dniach dojrzewania widoczna jest dalsza istotna tendencja spadku wartości współczynnika migracji jonów chlorkowych w betonie testowym. Oznacza to, że beton testowy wypada zdecydowanie lepiej w porównaniu z betonem z CEM II/B-V 42,5 R - HSR. Wydłużenie okresu dojrzewania do 90 dni w przypadku betonu z CEM V wpłynęło na dalsze spowolnienie migracji jonów chlorkowych w głąb betonu (rysunek 2).

Wskaźnik AF, wyznaczony na podstawie wyników migracji jonów chlorkowych w czasie (rysunek 3) na poziomie 0,85 (wykładnik funkcji potęgowej), wskazuje na dużą zależność szczelności betonu, wyrażonej zdolnością do migracji jonów chlorkowych, od czasu dojrzewania betonu w wodzie.



Rys. 3. Wyznaczenie wskaźnika ageing factor (AF) dla betonu z cementem ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA

Fig. 3. Determination of the ageing factor (AF) for concrete with cement ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA

3.4. Ocena statystyczna trwałości betonów z ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA i CEM II/B-V 42,5 R - HSR

W celu precyzyjnej oceny wpływu cementu ECOPlanet 5A o obniżonym śladzie węglowym na trwałość wykonano analizę statystyczną na podstawie zapisów raportu technicznego CEN/TR 16639 [13]. Za pomocą tego narzędzia porównano uzyskane właściwości betonu z cementem testowym do betonu referencyjnego, uwzględniając w przypadku wybranej właściwości poza średnim wynikiem z n-próbek liczbę próbek poddanych badaniu (n), a także odchylenie standardowe uzyskanych wyników pojedynczych oraz wartości graniczne współczynnika T_j w odniesieniu do ocenianego aspektu trwałości (j), przyjęte z dokumentu CEN/TR 16639 [13].

Warunkiem uzyskania pozytywnej oceny porównawczej jest większa wartość wyliczonego T_j od wartości granicznych $T_j=1,440$ (n=4) dla głębokości karbonatyzacji i $T_j=1,533$ (n=3) dla współczynnika migracji jonów chlorkowych. Wynik oceny statystycznej przedstawiono w tabelach 3 i 4.

Tab. 3. Ocena statystyczna równoważnych właściwości użytkowych dla głębokości karbonatyzacji oznaczonej na betonach dojrzewających 56 dni

Tab. 3. Assessment of the equivalent concrete performance for the carbonation depth determined on concretes aged 56 days.

Beton referencyjny	CEM II/B-V 42,5 R - HSR	T_j	Warunek	
Betony testowe	CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA	3,136	$T_j > 1,440$	Spełniony

Tab. 4. Ocena statystyczna równoważnych właściwości użytkowych dla migracji jonów chlorkowych oznaczonej na betonach dojrzewających 28 i 56 dni

Tab. 4. Statistical evaluation of the equivalent concrete performance for the chloride ion migration determined on concretes aged 28 and 56 days

Beton referencyjny	CEM II/B-V 42,5 R - HSR	T_j (28 dni)	T_j (56 dni)	Warunek
--------------------	-------------------------	----------------	----------------	---------

Betony testowe	CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA	13,073	14,545	$T_j > 1,533$	Spełniony
----------------	----------------------------------	--------	--------	---------------	-----------

Uzyskany efekt z przeprowadzonej oceny statystycznej jednoznacznie wskazuje, iż właściwości użytkowe betonu z ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA determinujące jego trwałość można uznać za równoważne z właściwościami betonu referencyjnego z CEM II/B-V 42,5 R - HSR.

4. Wnioski

Zaprezentowane wyniki badań wskazują, że niskoemisyjny cement ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA umożliwia osiągnięcie granicznych wartości kryteriów trwałości, porównywalnych z właściwościami betonu referencyjnego na bazie CEM II/B-V 42,5 R - HSR. Wykonana analiza statystyczna potwierdza przydatność metody koncepcji równoważnych właściwości użytkowych do potwierdzania możliwości zastosowania receptur uwzględniających cementy niskoemisyjne w składzie betonu. W wyniku analizy parametrów wpływających na trwałość betonu ustalono, że:

- Beton wykonany z cementu wieloskładnikowego ECOPlanet 5A w odróżnieniu do popiołowego cementu portlandzkiego CEM II/B-V 42,5 R - HSR osiągnął wymaganą klasę wytrzymałości C30/37 po 56 dniach dojrzewania. Wykazał porównywalny poziom karbonatyzacji co beton referencyjny i większą odporność na wnikanie jonów chlorkowych.
- Wskaźnik AF (ageing factor) betonu z cementem wieloskładnikowym ECOPlanet 5A oznaczony na podstawie uzyskanych wyników współczynnika migracji jednoznacznie wskazuje na dużą zależność szybkości wnikania jonów chlorkowych od czasu dojrzewania próbek, co potwierdza również spadek współczynnika migracji chlorków M_{nss} wraz z wydłużonym okresem sezonowania próbek w wodzie.
- W sytuacji, gdy zawartość cementu i wskaźnik w/c są stałe, odporność betonów na karbonatyzację i wnikanie jonów chlorkowych będzie w głównej mierze zależna nie tylko od ilości wodorotlenku wapnia zdolnego do wiązania dwutlenku węgla, ilości i rodzaju dodatku/ów w składzie cementu, ale również od właściwości mieszanki betonowej, w szczególności jej napowietrzenia i charakterystyki rozkładu porów kapilarnych w stwardniałym betonie decydujących o łatwości transportu agresywnych mediów.

- Zastosowanie cementu niskoemisyjnego ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA w betonie spełniającym wymagania klas ekspozycji XC i XD jest możliwe, co wykazały przeprowadzone badania.
- Zamiana cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/B-V 42,5 R - HSR na omawiany cement niskoemisyjny ECOPlanet 5A CEM V/A (S-V) 42,5 N - LH/HSR/NA w stosunku 1:1 pozwala zmniejszyć wskaźnik klinkierowy CF, a tym samym emisję CO₂ o ok. 24% .

Literatura

1. PN-EN 206+A1:2016-12: Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
2. PN-B-06265 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność, Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12
3. PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
4. PN-EN 12390-12:2020-06 Badania betonu. Część 12: Oznaczenie odporności betonu na karbonatyzację. Przyspieszona metoda karbonatyzacji
5. PN-EN 12390-18:2021-08 Badania betonu. Część 18: Oznaczenie współczynnika migracji chlorków
6. PN-EN 197-1:2012 Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
7. EN-1992-1-1:2008 Eurokod 2 - Projektowanie konstrukcji z betonu - Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
8. CEN/TR 16639:2014E. Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept. CEN, marzec 2014
9. Górak P., Gaudy J., Wójcik A., Grądzki A. Zmniejszenie śladu węglowego w konstrukcjach mostowych za pomocą rozwiązań materiałowych dla betonów opartych na cementach nisko-klinkierowych. Dni Betonu 2021.
10. Grzmil W., Raczkiewicz W. Ocena wpływu rodzaju cementu na proces karbonatyzacji betonu i korozji zbrojenia w próbkach żelbetowych. Cement, Wapno, Beton 2017 r. R-22/84 nr 4. 311-319;
11. Środa B. Cementy niskoklinkierowe – teraźniejszość i skomplikowana przyszłość. Budownictwo Technologie Architektura. 1/2022.

12. Elsalamawy M., Mohamed A.R., Kamal E.M. The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete. Alexandria Engineering Journal, V. 58 I. 4 p. 1257-1264, 2019.
13. Otieno M., Ikotun J., Ballim Y. Experimental investigations on the effect of concrete quality, exposure conditions and duration of initial moist curing on carbonation rate in concretes exposed to urban, inland environment. Construction and Building Materials, v. 246, 2020
14. Bouteiller V., Ceremona Ch., Baroghel-Bouny V., Maloula A. Corrosion initiation of reinforced concretes based on Portland or GGBS cements: Chloride contents and electrochemical characterizations versus time. Cement and Concrete Research. V. 42 I. 11. 2012