

Cementy niskoklinkierowe w prefabrykacji: Wpływ na właściwości betonu i optymalizację procesów produkcyjnych

Streszczenie

W obliczu postępujących zmian klimatycznych, prefabrykacja betonowa zyskuje na znaczeniu jako technologia sprzyjająca zrównoważonemu budownictwu. Nowoczesna prefabrykacja, oparta na precyzji produkcji, cyfrowych technologiach (BIM, AI) oraz betonie wysokiej jakości, umożliwia realizację obiektów o niskim śladzie węglowym przy zachowaniu wysokiej funkcjonalności i estetyki. Przemysł cementowy, będący znaczącym emitentem CO₂, intensyfikuje działania w kierunku dekarbonizacji. Kluczową rolę w obniżeniu emisyjności odgrywają cementy zawierające dodatki mineralne. Choć ograniczenie zawartości klinkieru w cemencie wiąże się z koniecznością optymalizacji receptur i stosowania dodatków poprawiających urabialność oraz wytrzymałość, stanowi ono fundamentalny kierunek rozwoju branży w kontekście realizacji celów Europejskiego Zielonego Ładu i transformacji przemysłu w kierunku niskoemisyjnym. W niniejszym referacie podjęto próbę analizy właściwości cementów niskoklinkierowych CEM II A-LL 42,5 R oraz CEM V/A (S-V) 42,5 N. W tym celu przeprowadzono ocenę równoważnych właściwości użytkowych z wykorzystaniem parametrów takich jak wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość, odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, mrozoodporność w roztworze soli odladzających oraz wodoszczelność. Przedstawiono również ocenę świeżej mieszanki betonowej. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań umożliwia sformułowanie wniosków końcowych, które – poza analizą parametrów technicznych – uwzględniają również potencjalne korzyści oraz zagrożenia związane z wdrożeniem cementów niskoemisyjnych jako standardowych spoiw stosowanych w technologii betonu.

Abstract

With climate change on the rise, concrete prefabrication is gaining importance as a technology that promotes sustainable construction. Modern prefabrication, based on precision manufacturing, digital technologies (BIM, AI) and high-quality concrete, enables the realization of buildings with a low carbon footprint while maintaining high functionality and aesthetics. The cement industry, a significant CO₂ emitter, is stepping up efforts to decarbonize. Cements containing mineral additives play a key role in decarbonization. Although reducing the clinker content of cement involves optimizing formulations and using additives to improve workability and strength, it represents a fundamental direction for the industry in the context of achieving the goals of the European Green Deal and the industry's low-carbon transformation. This paper attempts to analyze the properties of low-clinker cements CEM II A-LL 42.5 R and CEM V/A (S-V) 42.5 N. For this purpose, an evaluation of equivalent performance properties was carried out using parameters such as compressive strength, water absorption, resistance to cyclic freezing and thawing, frost resistance in de-icing salt solution and water resistance. An assessment of the fresh concrete mix was also presented. The comparison of the obtained test results enables the formulation of final conclusions which—beyond the analysis of technical parameters—also take into account potential benefits and risks related to the implementation of low-emission cements as standard binders used in concrete technology.

1. Wprowadzenie

Zmiany klimatyczne i ich skutki dla codziennego życia ludzi stanowią jedno z najpoważniejszych wyzwań współczesności. Zastosowanie prefabrykacji w budownictwie i architekturze otwiera możliwości wdrażania rozwiązań ograniczających negatywny wpływ obiektów budowlanych na środowisko. Tym samym prefabrykacja może odegrać istotną rolę zarówno w łagodzeniu skutków zmian klimatu, jak i w przystosowywaniu się do ich następstw [1].

Prefabrykacja ma w Polsce długoletnią tradycję, a jej intensywny rozwój przypada na lata 70. i 80. XX wieku, głównie w sektorze mieszkaniowym i przemysłowym. Choć ówczesne realizacje budziły zastrzeżenia pod względem funkcjonalnym i estetycznym, ich stan techniczny pozostaje na ogół dobry, a trwałość często przekracza zakładany okres eksploatacji. W ostatnich dwóch dekadach obserwujemy dynamiczny rozwój prefabrykacji nowej generacji, opartej na jakości, precyzji i elastyczności projektowej. Nowoczesna prefabrykacja korzysta z cyfrowych technologii (BIM, automatyzacja produkcji, technologii sztucznej inteligencji (AI)), betonu wysokiej jakości i domieszek chemicznych pozwalających osiągać bardzo dobrą powtarzalność właściwości betonu. Dzięki temu możliwe jest łączenie industrializacji z wysoką estetyką oraz zaawansowaną funkcjonalnością architektoniczną. [2][3].

Rozwój budownictwa zrównoważonego i zielonej architektury wynika ze wzrostu świadomości ekologicznej oraz wdrażania innowacyjnych metod ochrony środowiska. Sektor cementowy odpowiada za około 8% globalnych emisji CO₂, z czego większość generowana jest podczas procesu klinkieryzacji w piecach cementowych, przy czym w Polsce jego udział w rocznej emisji CO₂ wynosi 3,8%. Emisje te mają charakter zarówno procesowy (rozpad węgla wapnia $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), jak i energetyczny (spalanie paliw kopalnych). W związku z rosnącym znaczeniem polityki klimatycznej Unii Europejskiej, przemysł cementowy znalazł się w centrum działań dekarbonizacyjnych [4].

Pierwsze inicjatywy sektora cementowego w obszarze redukcji emisji pojawiły się około 1970 roku, kiedy to udzielono pierwszych patentów na niskoemisyjne cementy.

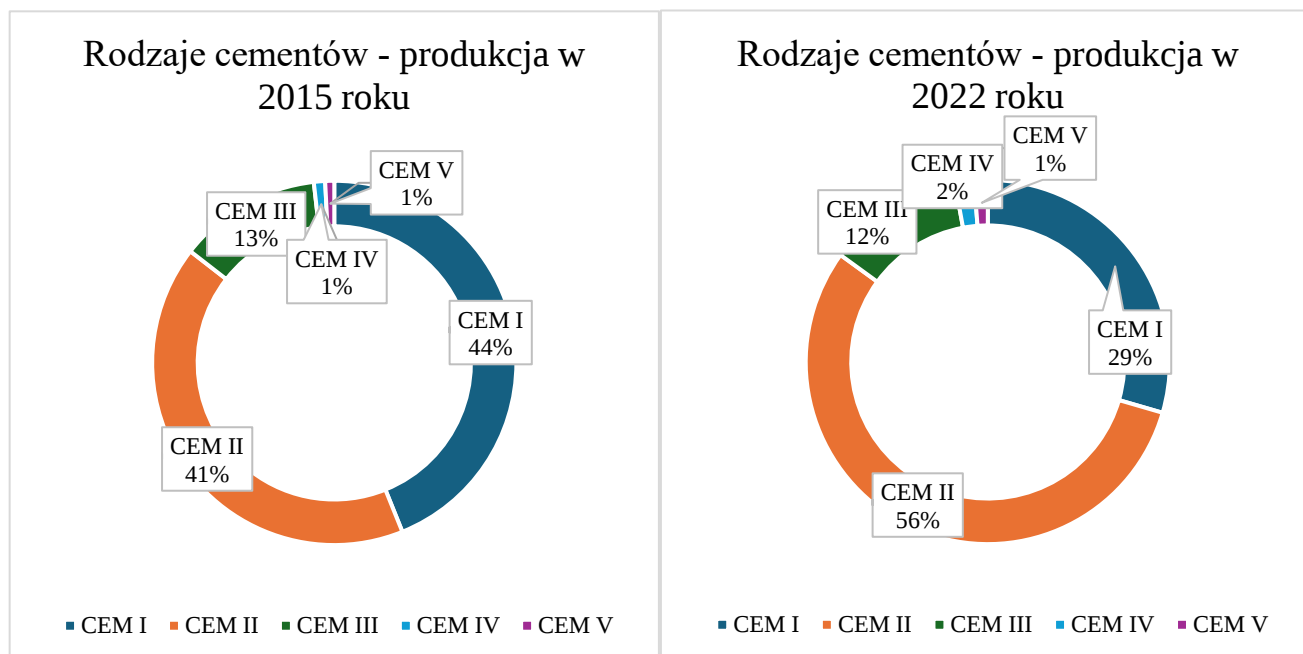
Zintensyfikowane działania nastąpiły w latach 2008–2009, a przełomowym momentem był szczyt klimatyczny w Kopenhadze w grudniu 2009 roku, który znacząco przyspieszył globalne działania na rzecz ochrony klimatu [5]. W obliczu narastającego kryzysu klimatycznego społeczność międzynarodowa podjęła w 2015 roku kluczową decyzję o przyjęciu porozumienia mającego na celu ograniczenie globalnego ocieplenia – tzw. Porozumienia paryskiego [6]. Dokument ten, przyjęty podczas Konferencji Stron (COP21), stał się fundamentem dla dalszych działań legislacyjnych i strategii klimatycznych, zarówno na poziomie globalnym, jak i unijnym. W odpowiedzi na zobowiązania wynikające z Porozumienia paryskiego, Unia Europejska ogłosiła 11 grudnia 2019 roku Europejski Zielony Ład (European Green Deal), którego głównym celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do roku 2050 [7]. Strategia ta obejmuje szeroki zakres działań mających na celu transformację gospodarki w kierunku niskoemisyjnym, ze szczególnym uwzględnieniem sektorów o wysokim poziomie emisji gazów cieplarnianych, takich jak przemysł cementowy i budowlany. W ramach Zielonego Ładu opracowano kompleksowy pakiet legislacyjny pod nazwą „Fit for 55”, który zakłada redukcję emisji gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej o co najmniej 55% do 2030 roku względem poziomów z 1990 roku, przy równoczesnym zachowaniu celu osiągnięcia zerowej emisji netto do 2050 roku [8].

W odpowiedzi na nowe regulacje i rosnącą presję społeczną oraz rynkową, producenci cementu rozpoczęli intensywne działania modernizacyjne i badawczo-rozwojowe w kierunku ograniczenia emisyjności produkcji. Działania te obejmują szerokie spektrum rozwiązań, takich jak:

- Zwiększenie udziału cementów niskoklinkierowych (np. CEM II, CEM III, CEM V) [9]
- Zastępowanie paliw kopalnych paliwami alternatywnymi (np. RDF, biomasa) – już dziś niektóre zakłady w Polsce osiągają >80% udziału paliw alternatywnych[10]
- Zwiększanie efektywności energetycznej pieców cementowych – modernizacja linii produkcyjnych, optymalizacja parametrów wypału [15]
- Wykorzystanie technologii wychwytu i składowania CO₂ (CCS – Carbon Capture and Storage/CCU – Carbon Capture and Utilization) [11] [12][15]
- Wykorzystanie cementów geopolimerowych [13]
- Recykling materiałów budowlanych jako surowców wtórnych – np. drobno zmielone kruszywa recykulowane lub stary beton [14]
- Cyfryzacja i monitoring śladu węglowego (LCA, EPD) – dokładne monitorowanie i redukcja emisyjności produktów prefabrykowanych.
- Lokalizacja produkcji blisko placu budowy – ograniczenie emisji transportowych. [5]

2. Cementy niskoklinkierowe

Współczesna produkcja cementu zmierza w kierunku zmniejszenia zawartości klinkieru portlandzkiego poprzez zastosowanie dodatków mineralnych, co jest odpowiedzią na wyzwania związane z dekarbonizacją przemysłu cementowego oraz ograniczoną dostępnością tradycyjnych surowców (Rys 1)



Rys 1. Produkcja cementów w roku 2015 oraz 2022 [9]

Najczęściej stosowane dodatki to granulowany żużel wielkopiecowy oraz popiół lotny krzemionkowy, które od lat są podstawą do produkcji cementów wieloskładnikowych o obniżonym śladzie węglowym. Granulowany żużel wielkopiecowy, zalicza się do grupy

materiałów hydraulicznych, które po aktywacji chemicznej wykazują zdolność wiązania i twardnienia pod wodą, tworząc fazy C-S-H analogiczne do powstających w wyniku hydratacji klinkieru portlandzkiego. W związku z planowaną dekarbonizacją przemysłu hutniczego, zakładającą wykorzystanie wodoru w procesie produkcji surowki żelaza, prognozuje się znaczny spadek dostępności granulowanego żużla wielkopiecowego. Cementy z wysokim udziałem żużla charakteryzują się niższą wytrzymałością wczesną, lecz lepszą trwałością długoterminową, wyższą odpornością chemiczną i niższym ciepłem hydratacji, co czyni je korzystnymi w zastosowaniach maszynowych.

Do materiałów pucolanowych zalicza się dodatki zawierające reaktywną krzemionkę, która w obecności wody i wodorotlenku wapnia w temperaturze pokojowej tworzy fazę C-S-H.

Naturalne pucolany pochodzą głównie z materiałów wulkanicznych i osadowych, jednak największe znaczenie praktyczne mają pucolany sztuczne, takie jak popioły lotne. Popioły krzemionkowe zawierają fazy glinokrzemianowe, które reagując z Ca(OH)_2 , przyczyniają się do wzrostu wytrzymałości betonu, natomiast popioły wapienne mogą dodatkowo wykazywać właściwości hydrauliczne. Kluczowy wpływ na aktywność pucolanową popiołów ma zawartość fazy szklistej oraz stopień ich rozdrobnienia. Im wyższa zawartość fazy szklistej i wyższy stopień rozdrobnienia popiołów tym te właściwości są lepsze.

Jako materiał wypełniający klasyfikuje się wapienie, uznawane za dodatek inertny, choć może wykazywać ograniczoną aktywność chemiczną w zaczynie cementowym. Wapienie stosowane w cemencie przyczyniają się głównie do poprawy urabialności mieszanki i obniżenia zawartości klinkieru, jednak nie mają istotnego wpływu na rozwój wytrzymałości. Ich jakość, ilość i skład chemiczny determinują odporność betonu na agresję chemiczną oraz mrozoodporność. Ze względu na dużą dostępność wapienia, prowadzi się badania nad zwiększeniem jego udziału w cemencie powyżej wartości normowych, nawet do 50% masy. W celu utrzymania odpowiednich właściwości mechanicznych betonu z wysoką zawartością wapienia, konieczne jest stosowanie niskiego wskaźnika wodno-cementowego oraz zaawansowanych domieszek uplastyczniających.

Materiałami, które są przedmiotem intensywnych badań, są także kalcynowane gliny, drobne frakcje (pyły) z recyklingu betonu oraz mieszanki popiołowo-żużłowe zalegające na starych składowiskach.

Należy jednak zauważyć, że zmniejszenie zawartości klinkieru, choć korzystne z punktu widzenia środowiskowego, może wpływać na właściwości mechaniczne i trwałościowe cementu. Klinkier jest głównym składnikiem decydującym o wytrzymałości, odporności chemicznej i trwałości materiału, a jego ograniczenie wiąże się z koniecznością szczegółowego badania wpływu nowych receptur na właściwości użytkowe betonu [5].

Cechy cementu, takie jak: wysoka dynamika narastania wytrzymałości wczesnych są kluczowe z punktu widzenia zastosowania cementu w segmentach takich jak: szeroko rozumiana prefabrykacja, beton komórkowy, czy betony towarowe stosowane w warunkach obniżonych temperatur otoczenia. Chcąc stosować bardziej ekologiczne rozwiązania w szerokim zakresie, również w przytoczonych segmentach, należy położyć duży nacisk na rozwój rozwiązań technologicznych, które umożliwią stosowanie cementów z niską zawartością klinkieru w tego typu segmentach.

3. Metodyka badań

Dobór materiałów do badań

W badaniach zastosowano dwa różne rodzaje cementów: cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA oraz cement portlandzki wapienny CEM II A-LL 42,5 R-NA. Skład przedstawiono w tabeli 1. Celem było porównanie ich wpływu na właściwości mieszanek betonowych dedykowanych do prefabrykacji

Skład chemiczny cementu	jednostki miary	Wyniki	
		CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA	CEM II A-LL 42,5 R-NA CEMEX RUDNIKI
SiO ₃	%	29,10	20,84
Al ₂ O ₃	%	9,70	5,51
Fe ₂ O ₃	%	3,00	3,22
CaO	%	46,90	61,71
MgO	%	2,70	2,35
Siarczany SO ₃	%	2,34	2,71
Na ₂ O	%	0,36	0,48
Cl ⁻	%	0,05	0,04

Tabela 1 Skład chemiczny badanych cementów

Cementy te różnią się zarówno zawartością klinkieru, jak i typem dodatków mineralnych, co może przekładać się na przebieg hydratacji, reologię świeżej mieszanki i parametry mechaniczne stwardniałego betonu.

wymiar otworów sita [mm]	piasek 0/2	żwir 2/8	żwir 8/16
	przechodzi przez sito [%]	przechodzi przez sito [%]	przechodzi przez sito [%]
13,5	-	-	100,0
16	-	100,0	95,5
8	-	88,2	4,5
4	100,0	33,6	0,9
2	97,8	1,7	0,7
1	85,1	0,6	0,6
0,5	46,4	0,4	0,4
0,25	5,3	0,3	0,3
0,125	0,2	0,2	0,2
0,063	0,1	0,1	0,1

Tabela 2 Uziarnienie kruszyw zastosowanych w mieszance betonowej

Do przygotowania mieszanek betonowych zastosowano naturalne kruszywa: piasek frakcji 0/2 mm, żwir 2/8 mm oraz żwir 8/16 mm. Uziarnienie poszczególnych frakcji przedstawiono w tabeli 2. W składzie mieszanki betonowej zastosowano domieszkę upłynniającą nowej generacji na bazie eterów polikarboksylowych (PCE) – Admitex HP 2,5. Użycie jej pozwoliło na znaczne obniżenie stosunku W/C i uzyskanie odpowiedniej klasy konsystencji.

Projektowanie mieszanek betonowych

Opracowano dwa warianty składu mieszanki betonowej, różniące się rodzajem zastosowanego cementu – pozostałe składniki oraz ich proporcje utrzymano bez zmian, co pozwoliło na bezpośrednie porównanie wpływu rodzaju spoiwa na właściwości betonu. Składy mieszanek zestawiono w tabeli 3.

skład testowanych betonów			
surowce	jednostka	mieszanka I	mieszanka II
cement CEM V/A (S-V) 42,5 N LH/HSR/NA	kg	350	-
cement CEM II A-LL 42,5 R-NA	kg	-	350
popiół	kg	157	
piasek 0/2	kg	721	
żwir 2/8	kg	469	
żwir 8/16	kg	484	
Domieszka Admitex HP2,5	kg	2,7	
Woda	kg	150	

Tabela 3 Skład testowanych mieszanek betonowych

Projektując receptury, uwzględniono warunki procesu prefabrykacji, takie jak krótki czas formowania, wymagania co do powierzchni elementów oraz oczekiwana wytrzymałość wczesna, umożliwiającą szybkie rozformowanie. Szczególną uwagę poświęcono optymalizacji stosunku W/C oraz dozowaniu domieszek upłynniających, w celu zapewnienia odpowiednich właściwości reologicznych mieszanki, ograniczenia segregacji składników, a także uzyskania wysokiej wytrzymałości wczesnej i odpowiedniej jakości powierzchni prefabrykowanego elementu.

Procedura badań

W pierwszej kolejności oceniono właściwości świeżej mieszanki betonowej. Pomiary obejmowały temperaturę świeżej mieszanki (Rys. 2), zawartość powietrza zgodnie z PN-EN 12350-7 (Rys. 3) oraz opad stożka według PN-EN 12350-2 wraz z analizą zmian konsystencji w czasie 30 minut (Rys. 4). Parametry te mają istotne znaczenie w kontekście technologii prefabrykacji, gdzie wymagane jest zachowanie odpowiednich właściwości roboczych mieszanki w ograniczonym przedziale czasowym między jej przygotowaniem a formowaniem elementów.

Wykonano pomiary własności fizycznych, w tym wykonano oznaczenia wytrzymałości na ściskanie wg PN-EN 12390-3 dla okresów dojrzewania 1, 2, 7, 28, 56 i 90 dni (Rys. 5). Przewidziano również badania trwałościowe po 56 oraz 90 dniach, zgodnie z zasadami oceny czasu równoważnego zawartymi w PN-EN 206 i krajowym uzupełnieniu PN-B-06265, co pozwoli określić długoterminowy potencjał wytrzymałościowy i trwałość na betonach z zastosowaniem cementów niskoklinkierowych. Badania trwałościowe obejmują odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie (mrozoodporność F150 wg PN-B-06265), mrozoodporność w roztworach soli odladzających (PN-B-06265), nasiąkliwość (PN-B-06250) oraz wodoszczelność (PN-B-06250).

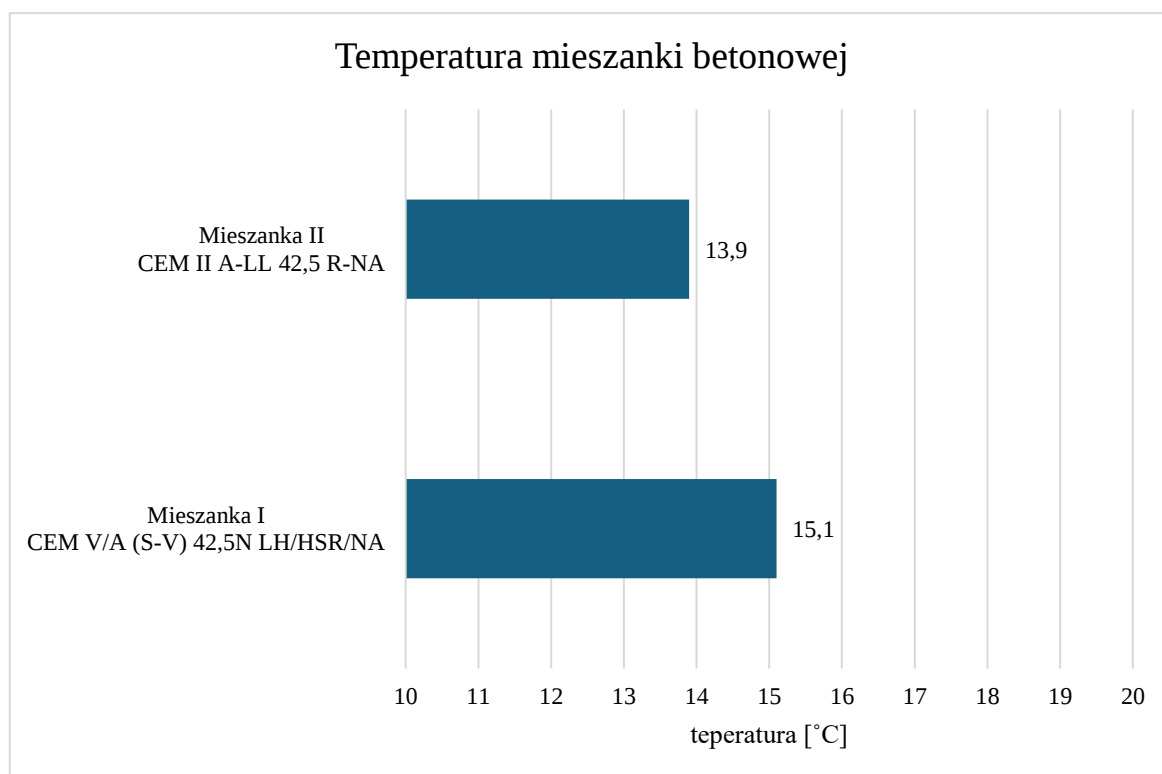
Równolegle oceniano jakość powierzchni elementów prefabrykowanych po rozformowaniu oraz czas niezbędny do osiągnięcia wytrzymałości pozwalającej na bezpieczne rozformowanie prefabrykatu, co jest kluczowym parametrem przy seryjnej produkcji elementów prefabrykowanych i wysokoestetycznych. Uzyskane wyniki będą stanowiły

podstawę do wyboru optymalnej mieszanki betonowej z zastosowaniem cementu niskoklinkierowego, dostosowanej do wymagań technologii prefabrykacji.

4. Wyniki badań i ich analiza

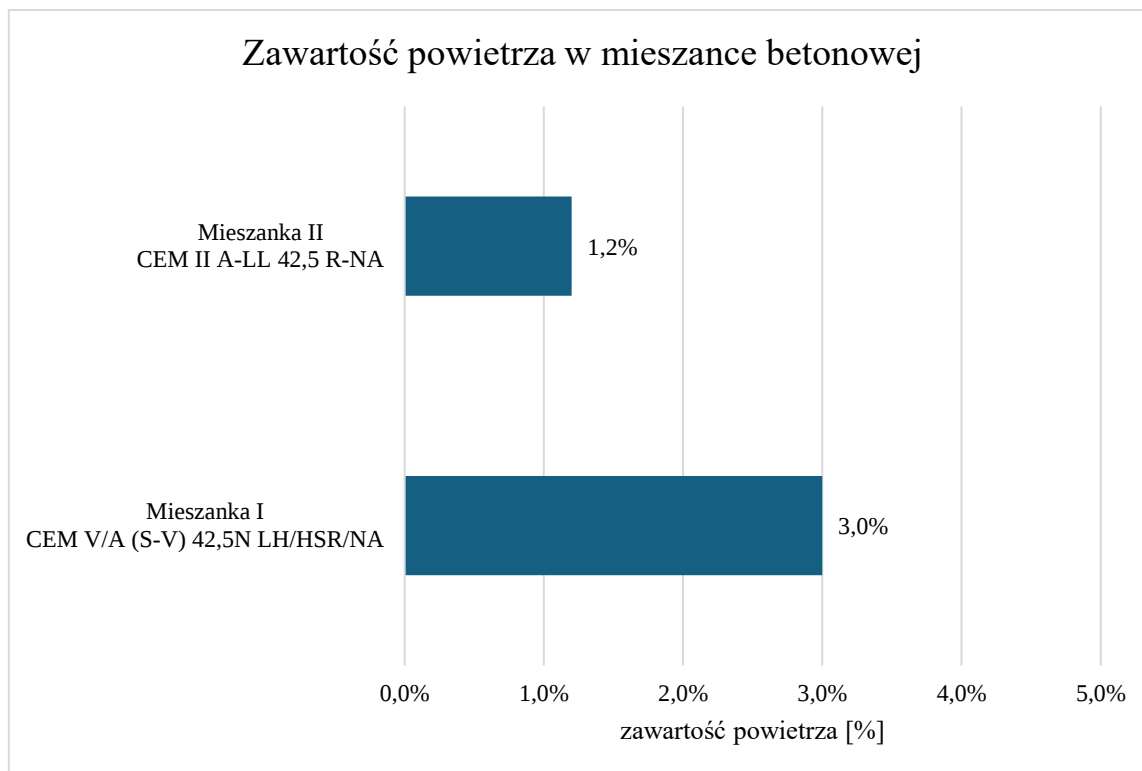
Wpływ cementów niskoklinkierowych na właściwości mieszanki betonowej

W badaniach mieszanek betonowych wykonanych z użyciem dwóch rodzajów cementu – CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA oraz CEM II A-LL 42,5 R-NA – zaobserwowano wyraźne różnice w reologii i parametrach świeżej mieszanki. Temperatura świeżej mieszanki betonowej bezpośrednio po wymieszaniu wynosiła 15,1 °C dla betonu na CEM V/A (S-V) 42,5 N oraz 13,9 °C dla betonu na CEM II A-LL 42,5 R (Rys.2). Betony były przygotowywane na węźle betoniarskim w trakcie bieżącej produkcji prefabrykatów, w warunkach wczesnowiosennych, przy niskich temperaturach otoczenia – co miało bezpośredni wpływ na temperaturę mieszanki betonowej.



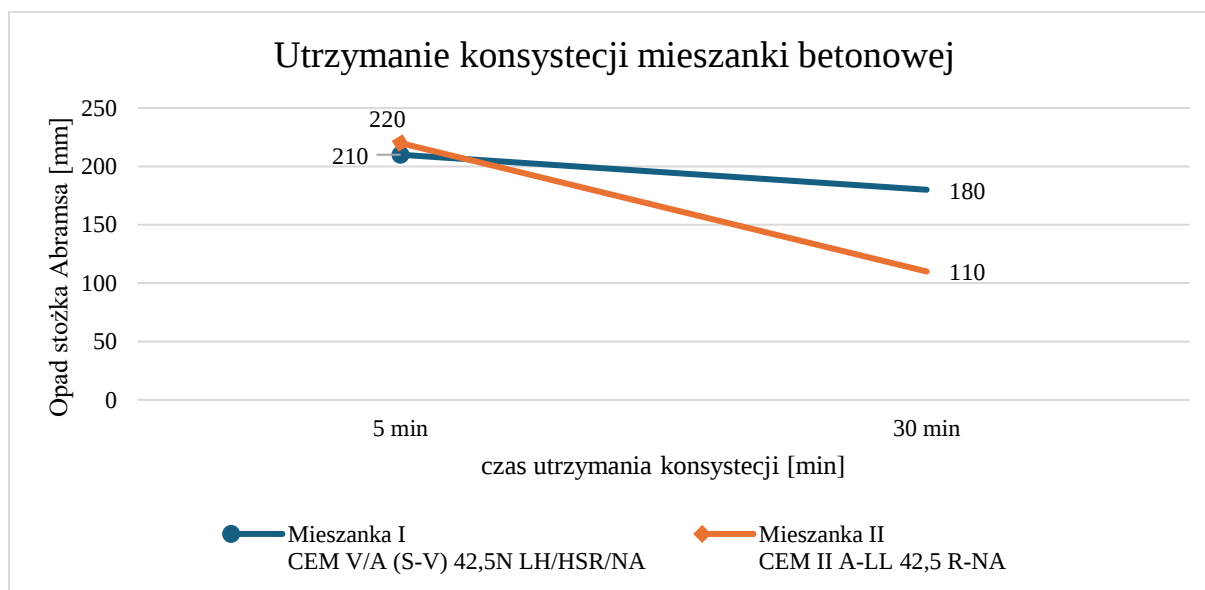
Rys. 2 Temperatura mieszanki betonowej z zastosowaniem cementów niskoklinkierowych

Zawartość powietrza, oznaczona zgodnie z PN-EN 12350-7, wyniosła 3,0% dla betonu z cementem CEM V/A (S-V) 42,5 N oraz 1,2% w przypadku betonu na CEM II A-LL 42,5 (Rys. 3). Różnica ta może wpływać na gęstość, urabialność oraz wytrzymałości stwardniałego betonu.



Rys. 3 Zawartość powietrza w mieszance betonowej zastosowaniem cementów niskoklinkierowych

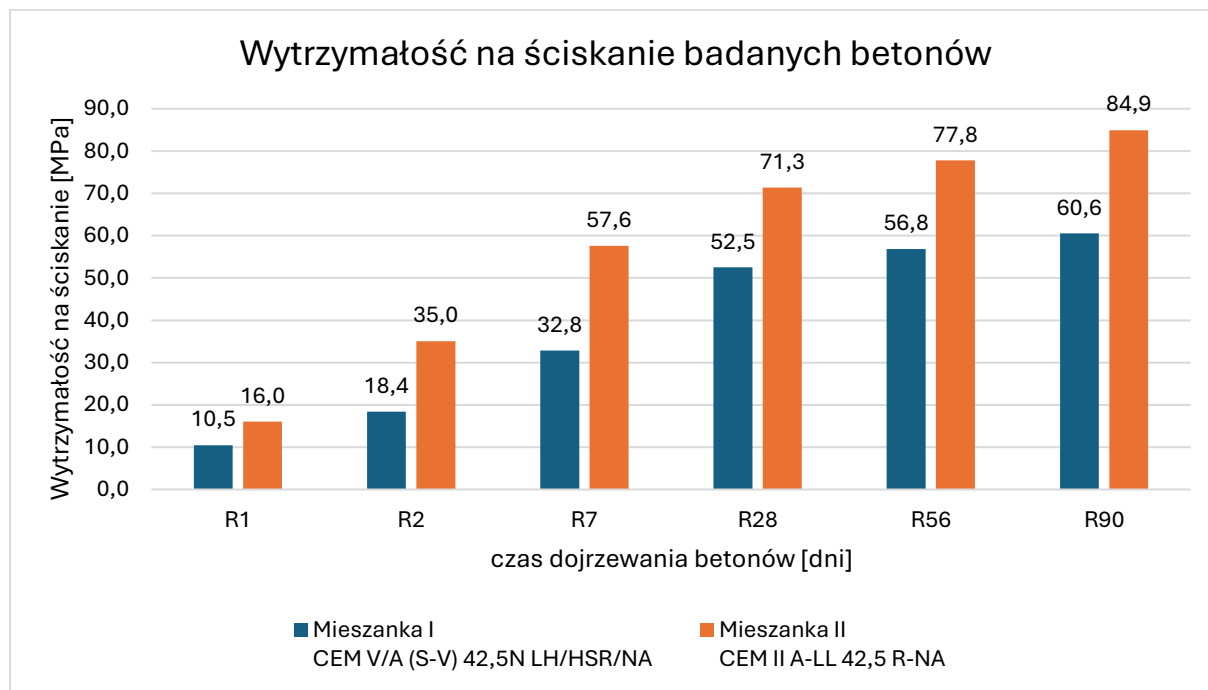
W zakresie utrzymania konsystencji, oznaczonej metodą stożka opadu wg PN-EN 12350-2, mieszanka na CEM II A-LL 42,5 R wykazała spadek opadu z 220 mm do 110 mm w ciągu 30 minut, natomiast mieszanka z CEM V/A (S-V) 42,5 N zachowała opad stożka w zakresie od 210 mm do 180 mm (Rys.4). Dane te jednoznacznie wskazują na większą stabilność reologiczną mieszanki z cementem CEM V/A (S-V) 42,5 N, co może być istotne w warunkach wydłużonego czasu układania lub transportu mieszanki betonowej w zakładach prefabrykacji.



Rys. 4 Utrzymanie konsystencji mieszanki betonowej w zastosowaniu cementów niskoklinkierowych

Porównanie wytrzymałości betonu z cementami niskoklinkierowymi

Wytrzymałość na ściskanie badano zgodnie z PN-EN 12390-3 w sześciu terminach: po 1, 2, 7, 28, 56 oraz 90 dniach dojrzewania (Rys. 5). Beton z cementem CEM II A-LL 42,5 R wykazał wyraźnie wyższe przyrosty wytrzymałości w porównaniu do mieszanki na CEM V/A (S-V) 42,5 N. Dla cementu wapiennego wartości wyniosły odpowiednio: 16,0 MPa (R1), 35,0 MPa (R2), 57,6 MPa (R7), 71,3 MPa (R28), 77,8 MPa (R56) oraz 84,9 MPa (R90). W tym samym czasie mieszanka z cementem wieloskładnikowym osiągnęła: 10,5 MPa, 18,4 MPa, 32,8 MPa, 52,5 MPa, 56,8 MPa oraz 60,6 MPa. Największa różnica widoczna była po 2 dniach – beton z CEM II A-LL osiągnął o 90% wyższą wytrzymałość niż beton z cementem CEM V/A. Po 28 dniach różnica ta wynosiła 36%, a po 90 dniach nadal utrzymywała się na poziomie 40%.

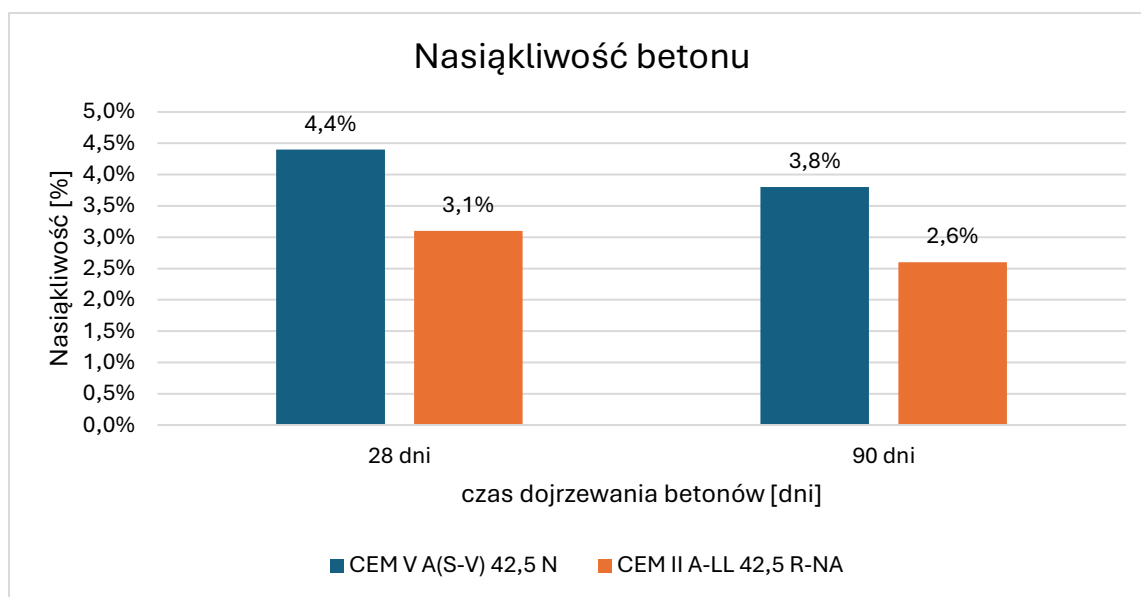


Rys. 5 Wytrzymałość na ściskanie betonów z zastosowaniem cementów niskoklinkierowych

W przypadku betonu z cementem CEM V/A (S-V) 42,5 N uzyskano niższe, ale stabilnie rosnące wartości wytrzymałości na ściskanie.

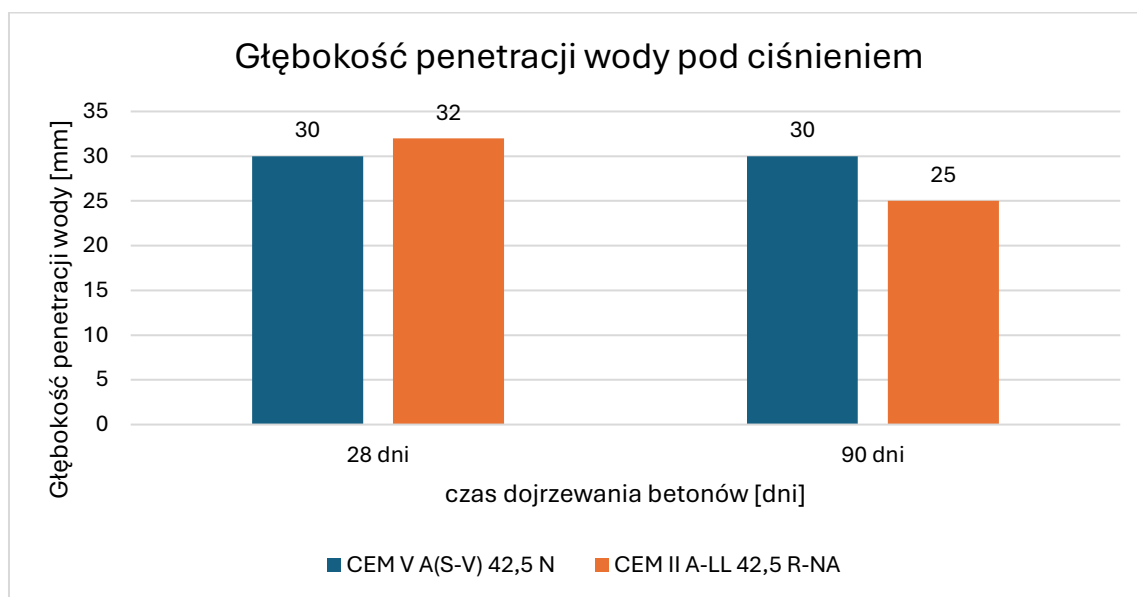
Ocena trwałości betonu prefabrykowanego

W ramach badań wykonano próbki do oceny parametrów trwałościowych, obejmujących nasiąkliwość objętościową, głębokość penetracji wody pod ciśnieniem, odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie (mrozoodporność), odporność na działanie soli odladzających oraz odporność na karbonatyzację. Badania przeprowadzono zgodnie z odpowiednimi normami: PN-B-06265, PN-EN 12390-8, PN-B-06250 oraz PN-EN 12390-12.



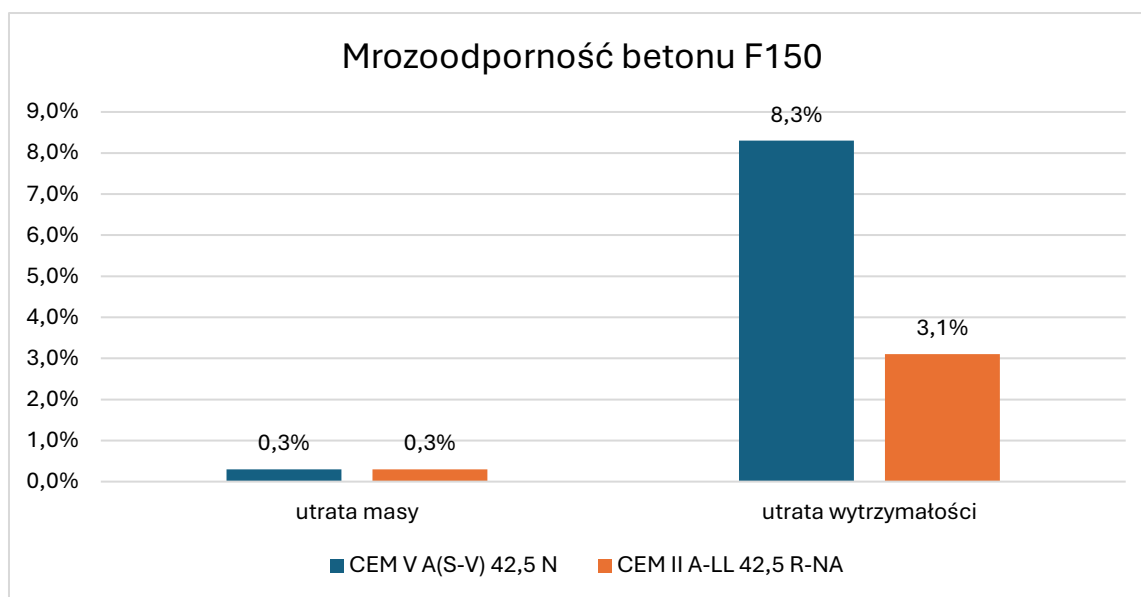
Rys. 6 Nasiąkliwość betonu

Nasiąkliwość betonu (Rys. 6) po 28 i 90 dniach wykazała różnice pomiędzy analizowanymi mieszankami. Beton wykonany na bazie cementu CEM II A-LL 42,5 R-NA charakteryzował się niższą nasiąkliwością: odpowiednio 3,1% (28 dni) oraz 2,6% (90 dni). Dla betonu z cementem CEM V/A (S-V) 42,5N wartości te wyniosły 4,4% oraz 3,8%.



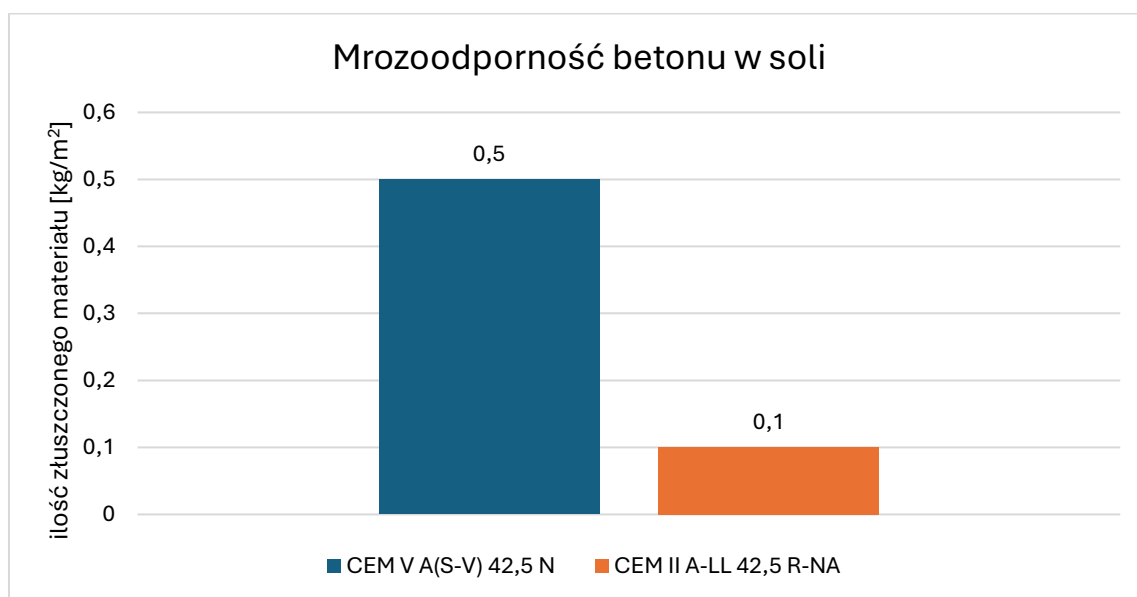
Rys. 7 Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Głębokość penetracji (Rys. 7) wody pod ciśnieniem została określona zgodnie z normą PN-EN 12390-8. Po 28 dniach dojrzewania wartości wyniosły: 32 mm dla mieszanki z CEM II A-LL oraz 30 mm dla mieszanki z CEM V/A. Po 90 dniach uzyskano wartości odpowiednio: 25 mm i 30 mm. W przypadku cementu wapiennego obserwowano wyraźny spadek głębokości penetracji o 22%.



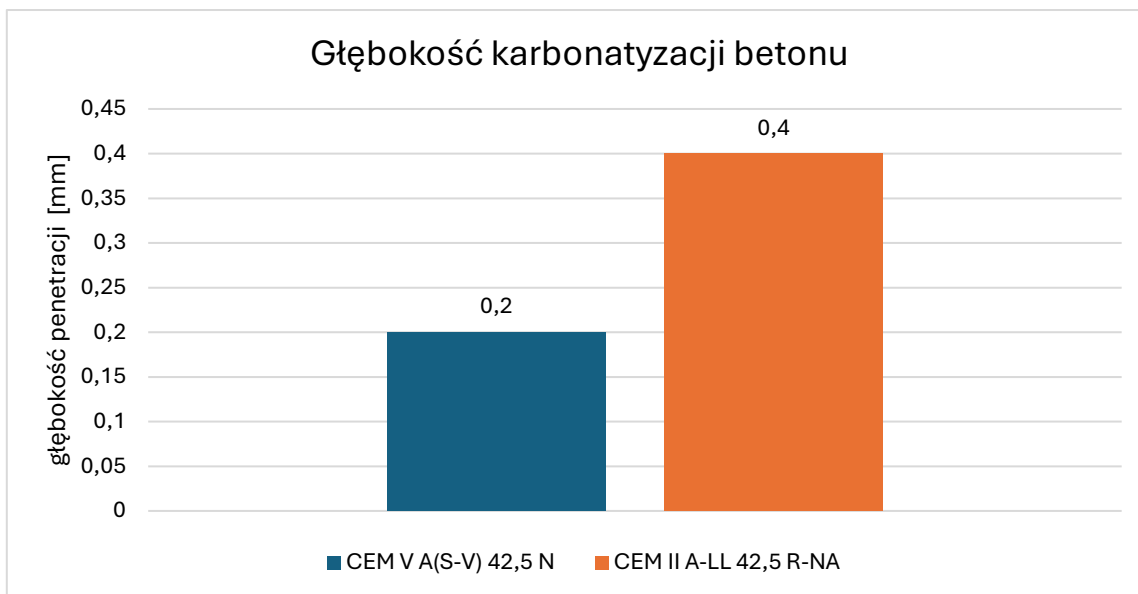
Rys. 8 Mrozoodporność betonu F150

Mrozoodporność betonu (Rys. 8) określono po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania. Obie mieszanki spełniły wymagania klasy F150, jednak zauważono różnice w poziomie utraty wytrzymałości na ściskanie. Dla mieszanki z CEM V/A (S-V) 42,5N odnotowano 8,3% spadku wytrzymałości, natomiast dla CEM II A-LL 42,5 R-NA wartość ta wyniosła 3,1%. Utrata masy dla obu betonów była na niskim poziomie i wyniosła 0,3%.



Rys. 9 Mrozoodporność betonu w soli

Odporność na działanie soli odladzających (Rys. 9) określono na podstawie ubytku materiału po ekspozycji na roztwór 3% NaCl. Beton na CEM V/A (S-V) 42,5N wykazał 0,5 kg/m² złuszczonego materiału, natomiast beton wapienny tylko 0,1 kg/m².



Rys. 10 Głębokość karbonatyzacji betonu

Karbonatyzację betonu (Rys. 10) badano zgodnie z normą PN-EN 12390-12. Dla mieszanki z cementem CEM V/A (S-V) 42,5N uzyskano wartość 0,2 mm, natomiast dla betonu CEM II A-LL 42,5 R-NA 0,4 mm.

Optymalizacja technologii prefabrykacji

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że oba analizowane rodzaje cementu umożliwiają uzyskanie betonu spełniającego wymagania technologiczne stosowane w prefabrykacji. Beton na bazie cementu CEM II A-LL 42,5 R charakteryzował się wyraźnie szybszym przyrostem wytrzymałości wczesnej, co pozwala na potencjalne skrócenie czasu formowania i zwiększenie rotacji form w zakładzie prefabrykacji. Mieszanka ta wykazała również niższą nasiąkliwość i mniejszą głębokość penetracji wody pod ciśnieniem po 90 dniach, co potwierdza korzystne właściwości w zakresie szczelności. Dodatkowo odnotowano mniejsze ubytki wytrzymałości na ściskanie po cyklach zamrażania i mniejsze złuszczenie powierzchni w kontakcie z solą odladzającą, co wskazuje na dobrą odporność materiału na czynniki środowiskowe. Z kolei beton z cementem CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA, ze względu na stopniowy przyrost wytrzymałości w początkowym okresie dojrzewania, wykazał bardzo dobrą stabilność reologiczną, co może być korzystne w przypadku produkcji elementów o dużej powierzchni lub złożonej geometrii, gdzie czas transportu lub układania mieszanki ulega wydłużeniu. Cement ten pozwalał na utrzymanie parametrów roboczych mieszanki w dłuższym czasie, co może mieć znaczenie przy prefabrykacji elementów wielkogabarytowych. Należy jednak zwrócić uwagę, że przy zastosowaniu cementu CEM V/A trudniejsze może być rozformowanie elementu już w kolejnym dniu po betonowaniu, zwłaszcza w warunkach obniżonej temperatury otoczenia. Pomimo tego, cement ten wykazał wysoką odporność na karbonatyzację oraz dobrą trwałość po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania. Klasa HSR (High Sulfate Resistance) sprawia, że może być stosowany w produkcji prefabrykatów narażonych na agresję chemiczną, np. w kanalizacji sanitarnej, zbiornikach na gnojowicę czy elementach infrastruktury rolniczej i przemysłowej.

W świetle powyższych obserwacji należy podkreślić, że cementy różnią się istotnie pod względem zastosowania właściwości technologicznych. Dlatego ich dobór powinien być świadomy i dostosowany do specyfiki danego zakładu prefabrykacji oraz rodzaju produkowanych elementów i środowiska ich eksploatacji

5. Wnioski i rekomendacje

Przeprowadzone badania pozwoliły na ocenę wpływu wybranych cementów niskoklinkierowych na właściwości mieszanki betonowej oraz parametry stwardniałego betonu w kontekście ich zastosowania w prefabrykacji. Zarówno cement CEM II A-LL 42,5 R-NA, jak i cement CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA umożliwiają uzyskanie mieszanek betonowych spełniających wymagania technologiczne stosowane w produkcji elementów prefabrykowanych. Z uwagi na odmienną charakterystykę ich działania, stosowanie każdego z cementów wymaga dopasowanego podejścia recepturowego i technologicznego.

Cement CEM II A-LL 42,5 R-NA pozwala na szybki przyrost wytrzymałości wczesnej, co może znacząco skrócić czas potrzebny na rozformowanie elementów oraz zwiększyć efektywność rotacji form w zakładach prefabrykacji. Mieszanki na tym cemencie charakteryzowały się również niższą nasiąkliwością i mniejszą głębokością penetracji wody, a także korzystniejszymi wynikami w zakresie mrozoodporności i odporności na działanie soli odladzających. Może to mieć szczególne znaczenie przy produkcji prefabrykatów przeznaczonych do eksploatacji w środowiskach narażonych na cykliczne zawilgocenie oraz zamarzanie.

Cement CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA, ze względu na stopniowy przyrost wytrzymałości w początkowym okresie dojrzewania, może nie być optymalnym wyborem w produkcji o wysokiej rotacji form, jednak wykazał bardzo dobrą stabilność właściwości reologicznych oraz korzystne wyniki w badaniu karbonatyzacji, co czyni go wartościowym rozwiązaniem przy prefabrykacji elementów wielkogabarytowych lub o złożonej geometrii. Odporności na siarczan (HSR) wskazuje na jego przydatność w środowiskach agresywnych chemicznie, w tym w infrastrukturze kanalizacyjnej i rolniczej.

Zastosowanie cementów niskoklinkierowych stanowi odpowiedź na wyzwania związane z redukcją emisji CO₂ w budownictwie i wpisuje się w strategię dekarbonizacji sektora materiałów budowlanych. Oprócz korzyści środowiskowych, cementy tego typu umożliwiają zagospodarowanie surowców wtórnych, co w określonych przypadkach może przynieść również oszczędności ekonomiczne, pod warunkiem zachowania powtarzalności parametrów i odpowiedniego nadzoru technologicznego.

W kontekście wdrażania cementów niskoklinkierowych w zakładach prefabrykacji zaleca się:

- dobór spoiwa w zależności od wymagań czasowych procesu rozformowania, typu produkcji oraz warunków eksploatacji,

- optymalizację receptur pod kątem trwałości i odporności środowiskowej,

- bieżące monitorowanie właściwości mieszanki i gotowych wyrobów, w tym odporności na działanie środowisk agresywnych.

Ze względu na różnice w parametrach fizykochemicznych, reologii i długoterminowym zachowaniu betonu, wybór odpowiedniego cementu niskoklinkierowego powinien być każdorazowo poprzedzony analizą technologicznych uwarunkowań danego zakładu prefabrykacji oraz oczekiwanych właściwości użytkowych projektowanego elementu.

Przeprowadzone badania potwierdzają, że właściwie zaprojektowane mieszanki z udziałem cementów niskoklinkierowych pozwalają na uzyskanie betonów o wysokiej trwałości,

spełniających wymagania środowiskowe i eksploatacyjne stawiane prefabrykatom stosowanym w nowoczesnym budownictwie.

Literatura:

- [1] Tofiluk A., Płoszaj M. Prefabrykacja betonowa, Builder 10/2022,
- [2] Adamczewski G., Woyciechowski P., Perspektywy Prefabrykacji, Builder 10/2024,
- [3] Adamczewski G., Woyciechowski P.: Prefabrykacja – jakość, trwałość, różnorodność. Zeszyt 1. Stowarzyszenie Producentów Betonów. Warszawa 2014.
- [4] <https://www.polskicement.pl/technologie-ccs-jedyna-szansa-na-zachowanie-konkurencyjnosc-sektora-cementowego-w-polsce/>
- [5] Nowicka-Semen J., Jak trwałe jest bycie „eko”? Analiza trwałości betonów z cementami niskoemisyjnymi, Materiały z Konferencji „Dni Betonu”. 2023
- [6] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), Paris Agreement, 2015.
- [7] European Commission, The European Green Deal, COM(2019) 640 final.
- [8] European Commission, Fit for 55 Package, 2021.
- [9] Informator SPC – Przemysł Cementowy w liczbach, <https://www.polskicement.pl/informatory/>
- [10] Przemysł cementowy w Polsce ogranicza emisję CO₂, Magazyn Biomasa, 2019
- [11] Miniszewski, M., Pilszyk, M., Czas na polski CCS? Szanse i wyzwania wychwytu i składowania CO₂ w polskim przemyśle, Polski Instytut Ekonomiczny, Warszawa, 2024
- [12] Nowak Wojciech, Strojny M., Gładysz P., Ściążko M., Wychwyt, wykorzystanie i składowanie dwutlenku węgla: przegląd rozwiązań i perspektywa dla Polski, Przegląd Odlewnictwa, 2023
- [13] Gołdek Ł., Geopolimery: nadchodząca rewolucja czy ślepy zaułek?, Budownictwo, Technologie, Architektura, 2024
- [14] Szafranko E., Recykling jako jeden z etapów cyklu życia obiektu budowlanego, Builder, 06/2020
- [15] Siemienuk J., Szatyłowicz E., Zmniejszenie emisji CO₂ w procesie produkcji cementu, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2018
- [16] Środa B., Cement i jego skład w erze dekarbonizacji, Budownictwo, Technologie, Architektura, 2024