

dr inż. Michał Talaś
mgr inż. Konrad Fita
mgr inż. Michał Woźniak
inż. Marcin Kwaśniewski
Mapei Polska Sp. z o.o.

Optymalizacja i obniżenie śladu węglowego betonów w prefabrykacji przy zastosowaniu domieszek przyspieszających twardnienie

Optimization and reduction of carbon footprint of concrete in precast through the use of hardening accelerating admixtures

Streszczenie

Rynek prefabrykacji betonowej w Polsce od kilku lat dynamicznie się rozwija sukcesywnie zwiększając swój udział w gospodarce krajowej. Wzrost popularności prefabrykacji betonowej jest wynikiem rosnącego zapotrzebowania na szybkie i efektywne rozwiązania budowlane, które jednocześnie oferują wysoką jakość i precyzję wykonania. Ponadto, prefabrykacja umożliwia redukcję kosztów pracy oraz czasu realizacji projektów, co sprawia, że staje się ona coraz bardziej atrakcyjna w kontekście rosnącej urbanizacji i potrzeby zrównoważonego budownictwa. Co więcej, biorąc pod uwagę wielkość tego segmentu budownictwa np. w państwach skandynawskich czy Niemczech wydaje się, że polski rynek prefabrykacji betonowej ma ciągle bardzo duży potencjał do wzrostu.

Beton na potrzeby prefabrykacji musi charakteryzować się wysokim przyrostem wytrzymałości wczesnych, aby umożliwić szybkie rozformowanie wykonywanych elementów oraz rotację szalunków. W tradycyjnych rozwiązaniach takie wymaganie wiąże się jednak z koniecznością stosowania dużych ilości wysokoemisyjnych cementów portlandzkich CEM I w składach mieszanek betonowych, co prowadzi do wysokich kosztów jednostkowych oraz znacznego śladu węglowego. Z tego samego powodu betony w prefabrykacji najczęściej są „przeprojektowane” (z ang. over-designed), to znaczy, że ich wytrzymałości po 28 dniach znacznie wykraczają poza wymaganą klasę wytrzymałości na ściskanie.

W artykule przedstawiono możliwości optymalizacji i redukcji śladu węglowego betonów na potrzeby prefabrykacji poprzez redukcję zawartości cementu i/lub zastosowanie cementu o obniżonej zawartości klinkieru portlandzkiego przy utrzymaniu jego kluczowych właściwości, tj. właściwości reologicznych oraz wysokich wytrzymałości wczesnych. W tym

celu zastosowano wysoce efektywne domieszki upłynniające oraz przyspieszające twardnienie, szczególnie w pierwszych 8-16 godzinach.

Uzyskane wyniki pokazują znaczny potencjał zarówno ograniczenia zużycia cementu w betonie do prefabrykacji, jak i szerszego zastosowania cementów innych niż cement portlandzki CEM I, a co się z tym wiąże jego optymalizację i redukcję śladu węglowego.

Abstract

The precast concrete market in Poland has been developing dynamically for several years, steadily increasing its share in the national economy. The growing popularity of precast concrete is a result of the rising demand for fast and efficient construction solutions that simultaneously offer high quality and precision. In addition, precast technology allows for the reduction of labor costs and project execution time, making it increasingly attractive in the context of growing urbanization and the need for sustainable construction. Moreover, considering the size of this construction segment in countries such as the Nordic states or Germany, it appears that the Polish precast concrete market still holds significant growth potential.

Concrete used for precast applications must achieve high early strength gain to allow for quick demolding of elements and rapid formwork rotation. In traditional solutions, meeting these requirements typically involves the use of large amounts of high-emission Portland cement (CEM I) in concrete mixes, leading to high unit costs and a significant carbon footprint. For the same reason, precast concrete mixes are often “over-designed,” meaning their 28-day compressive strengths significantly exceed the required strength class.

The article presents opportunities for optimizing and reducing the carbon footprint of concrete used in precast applications by lowering cement content and/or using cement with a reduced Portland clinker content, while maintaining key performance characteristics such as rheological properties and high early strength. To achieve this, highly effective superplasticizers and hardening accelerators were used, particularly active within the first 8 to 16 hours.

The results obtained show significant potential for both reducing cement consumption in precast concrete and promoting the broader use of cements other than CEM I, thereby enabling optimization and reduction of the associated carbon footprint.

1. Wprowadzenie

Projektowanie mieszanek betonowych jest procesem złożonym, który rozpoczyna się od określenia wymagań stawianych zarówno mieszance betonowej, jak i betonowi stwardniałemu. Priorytety projektowe mogą się znacząco różnić w zależności od docelowego zastosowania betonu. O ile klasa konsystencji oraz wytrzymałość na ściskanie, zgodnie z PN-EN 206 [1], należą do podstawowych i zawsze definiowanych właściwości, to coraz większą rolę odgrywa trwałość betonu rozpatrywana w kontekście całego jego cyklu życia. Podstawowym narzędziem służącym do projektowania trwałości betonu są klasy ekspozycji, określone w normach PN-EN 206 [1] oraz krajowym uzupełnieniu PN-B-06265 [2]. W zależności od przypisanej klasy ekspozycji, normy te definiują wymagania dotyczące m.in. minimalnej klasy wytrzymałości, maksymalnego stosunku wodno-cementowego, minimalnej zawartości cementu oraz jego rodzaju, przez co to trwałość, a nie wytrzymałość na ściskanie, staje się głównym kryterium projektowym. W praktyce jednak, poza systemem klas ekspozycji,

projektowanie trwałości betonu może uwzględniać również inne parametry – takie jak mrozoodporność (np. F150) czy szczelność określona jako głębokość penetracji wody pod ciśnieniem [3]. Niekiedy ograniczenia projektowe mieszanek betonowych wynikają z logistyki transportu, geometrii elementu lub technologii wykonania. W przypadku betonów masywnych konieczna jest redukcja ilości cementu ze względu na ciepło hydratacji [4], natomiast przy betonowaniu podwodnym mieszanka musi być odporna na wypłukiwanie składników, cechować się odpowiednią lepkością i stabilnością [5], co wymusza zastosowanie specjalnych domieszek i odpowiednio dobranych udziałów poszczególnych składników.

W przypadku produkcji elementów prefabrykowanych kluczowym kryterium stają się wytrzymałości wczesne, osiągane już po 12 lub 16 godzinach dojrzewania, a niekiedy nawet szybciej. Jest to warunek niezbędny do szybkiego rozformowania elementów, zwiększenia rotacji form oraz optymalizacji całego procesu produkcyjnego. Aby sprostać tym wymaganiom, mieszanki betonowe do prefabrykacji projektuje się z naciskiem na bardzo szybki przyrost wytrzymałości. Tradycyjnie cel ten realizowany jest poprzez wysokie dozowanie cementu portlandzkiego (CEM I), co jednak wiąże się zarówno z podwyższonymi kosztami produkcji, jak i istotnym śladem węglowym. Co więcej, takie podejście często prowadzi do „przeprojektowania” betonu, czyli uzyskiwania 28-dniowych wytrzymałości znacznie przekraczających wymagania stawiane dla przyjętej klasy wytrzymałości na ściskanie, co skutkuje niepotrzebnym obciążeniem środowiskowym i ekonomicznym.

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości optymalizacji składu mieszanki betonowej na potrzeby prefabrykacji poprzez zastosowanie domieszek chemicznych przyspieszających twardnienie, umożliwiających redukcję ilości cementu CEM I lub zastosowanie cementu o mniejszej zawartości klinkieru portlandzkiego w składzie przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych parametrów wczesnej wytrzymałości na ściskanie. Takie rozwiązanie pozwala na obniżenie kosztów, zmniejszenie emisji CO₂ i racjonalniejsze wykorzystanie surowców bez wpływu na proces produkcyjny oraz finalną jakość produktów.

2. Zastosowane materiały i składy mieszanek betonowych

2.1 Kruszywa

W badanych betonach zastosowano kruszywo drobne (piasek naturalny) frakcji 0/2 mm oraz kruszywo grube żwirowe frakcji 2/8 mm i 8/16 mm. Kruszywa spełniały wymagania normy PN-EN 12620+A1:2010 [6]. W tabeli 1 przedstawiono uziarnienie kruszyw oznaczone wg PN-EN 931-1:2012 [7].

Tabela 1. Wyniki analizy sitowej stosowanych kruszyw

Oznaczenie kruszywa	Zawartość frakcji przechodzącej przez sito [% mas.]										
	0,00 mm	0,063 mm	0,125 mm	0,250 mm	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm	4,0 mm	8,0 mm	16,0 mm	22,4 mm
Piasek 0/2 mm	0,0	0,4	3,8	23,5	62,3	82,5	98,4	100	100	100	100
Żwir 2/8 mm	0,0	0,3	1,3	2,5	4,2	7,9	23,6	62,5	98	100	100
Żwir 8/16 mm	0,0	0,1	0,5	0,8	1,2	1,6	2,7	4,9	26,6	94,9	100

2.2 Cementy i mączka wapienna

W badaniach zastosowano cementy o wysokiej wytrzymałości wczesnej CEM I 52,5 R oraz CEM II/A-V 52,5 R zgodnie z normą PN-EN 197-1 [8]. Cecha ta jest kluczowa dla betonów stosowanych w prefabrykacji. Umożliwia ona szybkie rozszalowanie form z produkowanymi elementami, a dzięki temu oszczędność czasu, kosztów oraz ogólne zwiększenie efektywności zakładów prefabrykacji. Cement CEM I 52,5 R to od wielu lat podstawowy rodzaj cementu stosowany w mieszankach betonowych stosowanych w prefabrykacji. Wyzwania związane z koniecznością obniżenia śladu węglowego cementu i betonu zmusza do szukania nowych rozwiązań takich jak zastosowanie nowoczesnych cementów wieloskładnikowych typu drugiego (CEM II). W tabeli 2 przedstawiono właściwości ww. cementów (dane od producentów na Q2 2025).

Tabela 2. Właściwości stosowanych cementów

Właściwości	CEM I 52,5 R	CEM II/A-V 52,5 R
Początek czasu wiązania [min]	208	181
Koniec czasu wiązania [min]	266	219
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	41,1	32,4
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	65,8	61,3
Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	4612	5030
GWP brutto (A1-A3) [kg eq CO ₂]	812	581

Jako kruszywo wypełniające stosowano mączkę wapienną spełniającą wymagania normy PN-EN 12620+A1:2010 [6]. W tabeli 3 zestawiono jej podstawowe właściwości.

Tabela 3. Właściwości stosowanej mączki wapiennej

Właściwości	Deklarowane właściwości użytkowe
Uziarnienie - wymiar oczka sita kontrolnego	% masy przechodzącej
2 mm	100
0,125 mm	97±3
0,063 mm	90±10
Gęstość ziarn [Mg/m ³]	2,60-2,75
Pyły, f [%]	70-100

2.3 Domieszki chemiczne

Zastosowano dwa rodzaje domieszek chemicznych Mapei Polska dedykowanych do mieszanek betonowych na potrzeby prefabrykacji: wysoce efektywny superplastyfikator Dynamon NRG 1037 oraz domieszkę przyspieszającą twardnienie Mapecube 1. Mapecube 1 to bezchlorkowa domieszka nowej generacji, opracowana w celu przyspieszenia rozwoju wytrzymałości wczesnej, bez negatywnego wpływu na trwałość betonu. Działa poprzez intensyfikację procesu hydratacji, co umożliwia szybsze rozformowanie elementów oraz skrócenie cyklu produkcyjnego. Szczególnie sprawdza się w przypadku betonów produkowanych w niskich temperaturach lub tam, gdzie wymagane są wysokie parametry mechaniczne już w ciągu pierwszych godzin dojrzewania. W kolejnych rozdziałach domieszka Mapecube 1 będzie oznaczana jako MC1.

Tabela 4. Właściwości fizykochemiczne zastosowanych domieszek

Właściwości	Domieszka chemiczna	
	Dynamon NRG 1037	Mapecube 1
Składnik podstawowy	Eter polikarboksylowy	Nanokrystaliczne fazy C-S-H
Barwa	Bursztynowy	Fioletowy
Gęstość (w 20 °C)	1,05 ± 0,02	1,14 ± 0,03
Odczyn pH (w 20 °C)	5,5 ± 1,0	11 ± 0,1
Zawartość części stałych [% mas.]	32	30
Zawartość jonów chlorkowych [% mas.]	< 0,1	< 0,1

2.4 Składy badanych betonów

Zaprojektowano beton samozagęszczalny C50/60 o konsystencji SF2. Beton referencyjny zawierał w swoim składzie 430 kg CEM I 52,5R i 70 kg mączki wapiennej (beton REF.). Celem badań było zredukowanie ilości cementu oraz zamiany CEM I 52,5 R na CEM II/A-V 52,5R z zachowaniem właściwości betonu tj. wytrzymałości wczesnej, klasy wytrzymałości po 28 dniach oraz klasy konsystencji SF2. Przyjęto redukcję ilości cementu na poziomie 30 kg oraz 60 kg względem receptury bazowej. Dla zachowania właściwości betonu SCC w recepturach zoptymalizowanych zwiększono zawartość mączki wapiennej do 100 kg. Zawartość superplastyfikatora Dynamon NRG 1037 dobrano na podstawie badań w sposób zapewniający utrzymanie konsystencji SF2, a zawartość domieszki przyspieszającej twerdnienie Mapecube 1 ustalono na poziomie 2% oraz 4% masy cementu. Przedstawiona w tabeli 5 zawartość wody efektywnej obejmuje wodę wprowadzoną przez domieszki chemiczne zgodnie z PN-EN 206 1.

Tabela 5. Skład badanych betonów

Składniki	Jedn.	Warianty mieszanek								
		ref.	Ref. + MC1		-30 kg cementu			- 60 kg cementu		
Cement	kg/m ³	430	430	430	400	400	400	370	370	370
Mączka wapienna	kg/m ³	70	70	70	100	100	100	100	100	100
Woda efektywna	kg/m ³	165	165	165	165	165	165	165	165	165
Piasek 0-2 mm	kg/m ³	626	626	626	631	631	631	641	641	641
Żwir 2/8	kg/m ³	445	445	445	449	449	449	456	456	456
Żwir 8/16	kg/m ³	577	577	577	582	582	582	591	591	591
NRG 1037 – CEM I 52,5 R	% m.c.	1,08	-	-	1,08	1,1	1,12	1,15	1,15	1,25
NRG 1037 – CEM II/A-V 52,5 R	% m.c.	0,95	1,01	1,04	0,95	0,95	1,04	1,02	1,11	1,13
Mapecube 1	% m.c.	-	2,0	4,0	-	2,0	4,0	-	2,0	4,0
w/c	-	0,38	0,38	0,38	0,41	0,41	0,41	0,45	0,45	0,45

3. Właściwości badanych betonów

3.1 Zastosowane metody badawcze

Badane mieszanki betonowe zbadano pod kątem ich gęstości, zawartości powietrza oraz konsystencji. Dla betonów stwardniałych sprawdzana była wytrzymałość na ściskanie po 12, 16 i 24 godzinach oraz 28 dniach (kostki 100x100x100 mm). Ponadto wytrzymałość na ściskanie po 16 godzinach sprawdzano dla betonów dojrzewających zarówno w warunkach laboratoryjnych ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) oraz w obniżonej temperaturze (5°C). W tabeli 6 zestawiono zastosowane metody badawcze.

Tabela 6. Zastosowane metody badawcze do określenia właściwości mieszanek betonowych oraz betonów stwardniałych

Badany materiał	Właściwość	Oznaczenie według normy
Mieszanka betonowa	Gęstość	PN-EN 12350-6:2019-08 [9]
	Zawartość powietrza	PN-EN 12350-7:2019-08 [10]
	Konsystencja	PN-EN 12350-8:2019-07 [11]
Beton stwardniały	Wytrzymałość na ściskanie	PN-EN 12390-3:2019-07 [12]

3.2 Właściwości mieszanek betonowych

Tabela 7 przedstawia zestawienie właściwości mieszanek betonowych wykonanych z dwóch rodzajów cementu: CEM I 52,5 R oraz CEM II/A-V 52,5 R. Wszystkie mieszanki zostały zaprojektowane tak, aby uzyskać i utrzymać porównywalną konsystencję odpowiadającą klasie SF2 według metody rozplywu (tj. rozplyw w zakresie 660–750 mm, zgodnie z normą EN 12350-8 [11]) do 25 minut, co jest czasem wystarczającym dla procesu technologicznego w większości zakładów prefabrykacji. Warianty mieszanek różniły się nie tylko ilością cementu i mączki wapiennej, ale również obecnością oraz dozowaniem domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1. Mieszanki zawierające domieszkę przyspieszającą twardnienie wymagały zwiększania ilości superplastyfikatora w celu utrzymania założonej konsystencji (rysunek 1). Mieszanki wykonane z cementu CEM II/A-V 52,5 R wymagały znacznie niższych dozowań superplastyfikatora w porównaniu do odpowiadających im mieszanek z cementem CEM I 52,5 R (tabela 5). Napowietrzenie mieszanek utrzymywało się na stałym i niskim poziomie (1,7–2,2% obj.), nie wykazując istotnego wpływu domieszki przyspieszającej na ten parametr.



Rys. 1. Badanie konsystencji betonu metodą rozplywu stożka wg PN-EN 12350-8 [11]

Tabela 7. Właściwości mieszanek betonowych

Wariant betonu	CEM I 52,5 R				CEM II/A-V 52,5 R			
	Gęstość mieszanki [kg/m³]	Napowietrzenie mieszanki [% obj.]	Rozplyw [mm]		Gęstość mieszanki [kg/m³]	Napowietrzenie mieszanki [% obj.]	Rozplyw [mm]	
			5 min.	25 min.			5 min.	25 min.
430+70 referencja	2400	1,8	720	700	2380	2,1	760	740
430+70 2% m.c. MC1	nie badano				2400	1,7	740	720
430+70 4% m.c. MC1					2390	1,9	710	690
400+100 0% m.c. MC1	2410	1,9	730	700	2350	2,2	740	670
400+100 2% m.c. MC1	2400	2,0	690	660	2350	2,1	720	650
400+100 4% m.c. MC1	2400	1,8	700	700	2380	2,0	720	670
370+100 0% m.c. MC1	2390	2,1	750	730	2370	1,9	750	730
370+100 2% m.c. MC1	2390	2,0	670	660	2380	2,0	750	700
370+100 4% m.c. MC1	2390	2,2	730	700	2370	1,8	740	700

MC1 – domieszka przyspieszająca twardnienie Mapecube 1

3.3 Wytrzymałość na ściskanie

W tabeli 8 zestawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich zbadanych betonów. Każdy z wariantów zostanie szczegółowo omówiony w kolejnych podpunktach.

Tabela 8. Wytrzymałość na ściskanie badanych betonów [MPa]

Wariant betonu	CEM I 52,5 R					CEM II/A-V 52,5 R				
	12h	16h	16h 5°C	24h	28d	12h	16h	16h 5°C	24h	28d
430+70 referencja	19,8	27,5	11,1	37,1	91,2	16,3	22,9	8,4	31,9	72,3
430+70 2% m.c. MC1	-					22,4	28,3	12,6	33,0	77,2
430+70 4% m.c. MC1						23,9	30,1	16,7	35,2	79,0
400+100 0% m.c. MC1	18,0	26,3	9,8	32,8	84,5	14,5	21,7	7,6	27,3	67,8
400+100 2% m.c. MC1	24,2	33,6	13,2	38,1	81,1	19,7	24,5	11,3	30,9	70,1
400+100 4% m.c. MC1	26,8	35,2	18,3	39,9	77,3	21,8	26,3	16,1	32,4	70,9
370+100 0% m.c. MC1	14,3	24,1	8,1	30,1	79,9	10,9	19,0	6,8	25,7	65,0
370+100 2% m.c. MC1	22,6	30,1	12,1	34,8	76,2	17,1	21,5	9,7	27,6	66,9
370+100 4% m.c. MC1	24,6	32,4	16,5	36,7	73,1	18,9	23,7	13,1	29,3	68,5

MC1 – domieszka przyspieszająca twardnienie Mapecube 1

3.2.1 Wytrzymałości wczesne

Na rysunkach 2,3 i 4 przedstawiono porównanie wytrzymałości na ściskanie po 12,16 oraz 24 godzinach dojrzewania dla badanych betonów. We wszystkich przypadkach te same warianty betonów z cementem CEM I 52,5 R osiągnęły wyższe wytrzymałości wczesne niż ich odpowiedniki na bazie cementu CEM II/A-V 52,5 R. Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdzają, że cement CEM I 52,5 R charakteryzuje się lepszymi parametrami wytrzymałościowymi w pierwszych godzinach dojrzewania i twardnienia, co czyni go najbardziej efektywnym rozwiązaniem w zastosowaniach prefabrykacyjnych w przypadku braku stosowania domieszek przyspieszających twardnienie.

Uzyskane w badaniach wyniki można analizować w trzech podejściach:

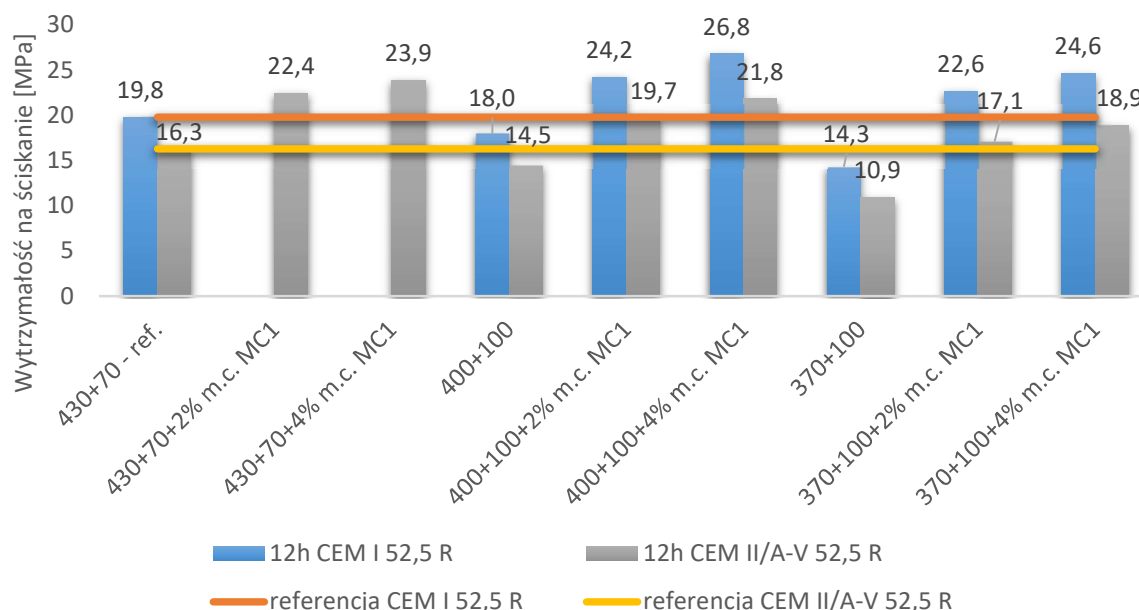
- 1) możliwość redukcji cementu przy zachowaniu tego samego rodzaju cementu;
- 2) możliwość zastąpienia cementu CEM I 52,5 R cementem CEM II/A-V 52,5 R przy utrzymaniu właściwości referencyjnych;
- 3) jednoczesna zamiana cementu CEM I 52,5 R na CEM II/A-V 52,5 R oraz redukcja ilości cementu.

Wyniki po 12 godzinach dojrzewania

Po 12 godzinach dojrzewania referencyjny beton z cementem CEM I 52,5 R w ilości 430 kg/m³ uzyskał wytrzymałość na ściskanie równą 19,8 MPa (rysunek 2). Zastosowanie domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 w ilości 2% masy cementu, przy jednoczesnym obniżeniu ilości cementu o 60 kg/m³, pozwoliło osiągnąć wyższą wytrzymałość na ściskanie - 22,6 MPa. Zwiększenie dozowania domieszki do 4% m.c. przyniosło jeszcze lepszy rezultat – 24,6 MPa, co wskazuje na możliwość dalszej optymalizacji składu mieszanki, jeśli kluczowym kryterium projektowym byłaby wytrzymałość po 12 godzinach.

W przypadku zastąpienia cementu CEM I 52,5 R cementem CEM II/A-V 52,5 R w mieszance referencyjnej (bez zmiany całkowitej zawartości cementu) i dodaniu 2% Mapecube 1 odnotowano wzrost wytrzymałości do poziomu 22,4 MPa. Przy 4% m.c. dozowania Mapecube 1 wynik ten wzrósł do 23,9 MPa, co potwierdza skuteczność domieszki w kompensowaniu wolniejszego przyrostu wytrzymałości charakterystycznego dla cementów o obniżonej zawartości klinkieru portlandzkiego w ich składzie.

Najbardziej wymagający wariant – czyli jednoczesna redukcja cementu (o 30 lub 60 kg/m³) oraz jego zamiana na CEM II – okazał się możliwy do realizacji. Dla układu z 400 kg/m³ cementu (30 kg/m³ redukcji) i dodatkiem 2% lub 4% m.c. domieszki przyspieszającej twardnienie uzyskano odpowiednio 19,7 i 21,8 MPa. Nawet w najbardziej zoptymalizowanej mieszance (redukcja 60 kg/m³, 4% m.c. Mapecube 1) uzyskano wynik 18,9 MPa – zaledwie 0,9 MPa poniżej referencji na CEM I 52,5 R, co można uznać za równoważny rezultat z punktu widzenia praktycznego.



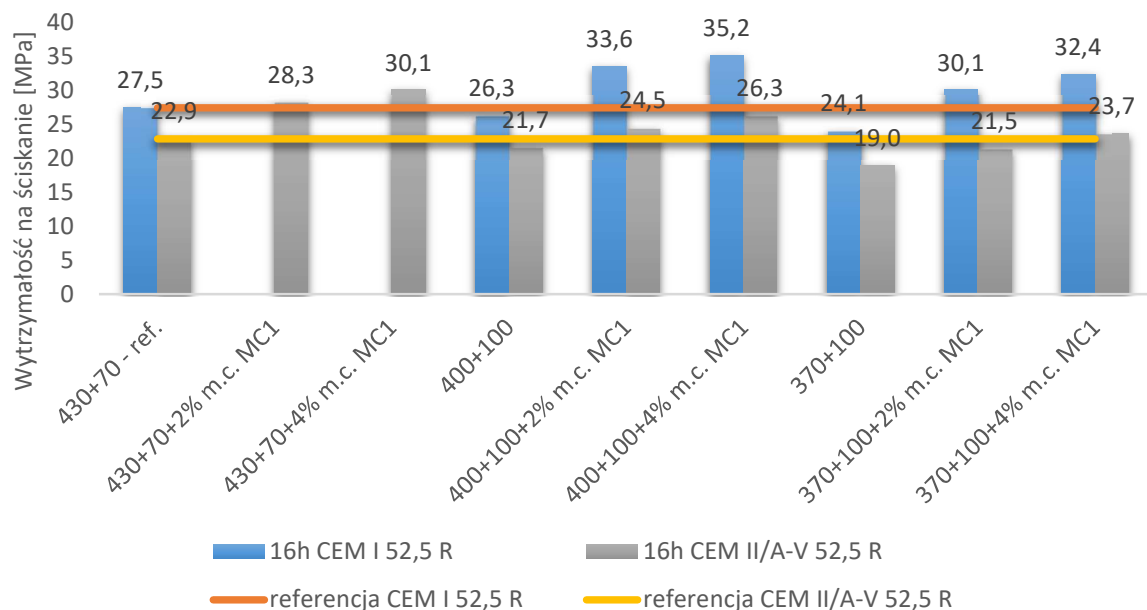
Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie po 12 godzinach dojrzewania

Wyniki po 16 godzinach dojrzewania

Po 16 godzinach dojrzewania referencyjny beton z cementem CEM I 52,5 R (430 kg/m^3) osiągnął wytrzymałość na poziomie 27,5 MPa (rysunek 3). Zastosowanie domieszki Mapecube 1 w ilości 2% m.c. i jednoczesna redukcja cementu o 60 kg/m^3 pozwoliły na uzyskanie wyższej wytrzymałości – 30,1 MPa. Zwiększenie dozowania do 4% m.c. dało jeszcze lepszy efekt: 32,4 MPa, czyli aż o 4,9 MPa więcej niż referencja. Wskazuje to na bardzo wysoką skuteczność działania domieszki przyspieszającej i otwiera możliwość dalszej optymalizacji ekonomiczno-technologicznej.

Podobny efekt obserwuje się przy zamianie cementu CEM I 52,5 R na CEM II/A-V 52,5 R bez zmiany jego ilości. Z dodatkiem 2% m.c. domieszki przyspieszającej uzyskano 28,3 MPa, a przy 4% – 30,1 MPa, a więc oba warianty przewyższają poziom wytrzymałości betonu referencyjnego z CEM I.

Wariant zakładający jednoczesną zamianę cementu i jego redukcję także przyniósł bardzo dobre rezultaty. W przypadku redukcji o 30 kg/m^3 i zastosowania 4% m.c. Mapecube 1 uzyskano wytrzymałość 26,3 MPa, co było niższe od referencji na CEM I o 1,2 MPa. Nawet przy większej redukcji cementu (o 60 kg/m^3) i 4% m.c. domieszki wytrzymałość wyniosła 23,7 MPa, co oznacza tylko 3,8 MPa różnicy względem referencji, przy jednoczesnym znacznie niższym zużyciu cementu i niższym śladzie węglowym.



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie po 16 godzinach dojrzewania

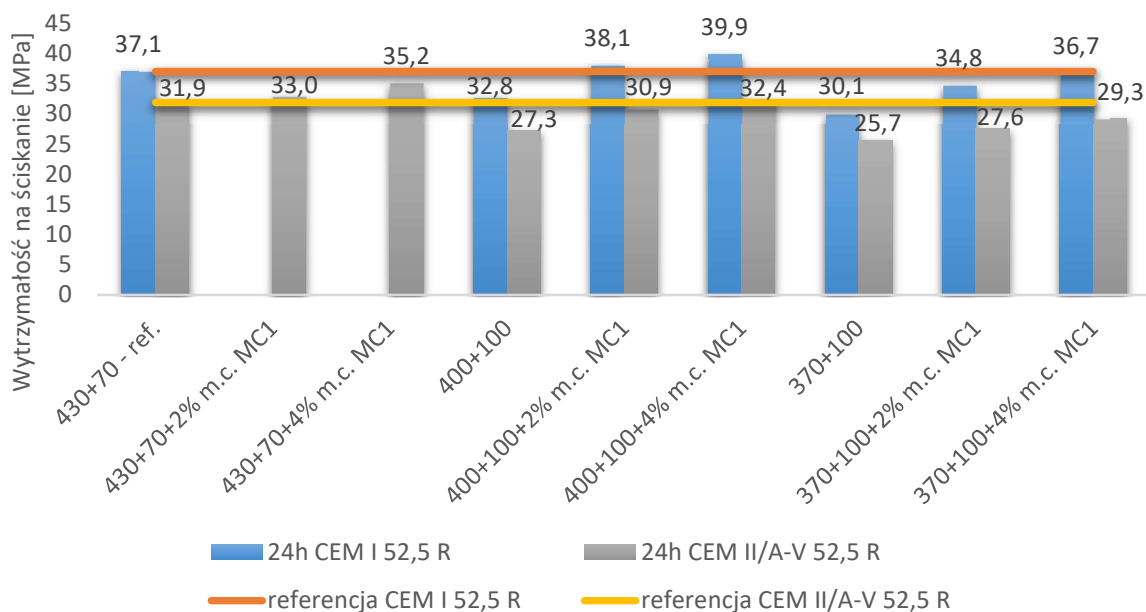
Wyniki po 24 godzinach dojrzewania

Po 24 godzinach dojrzewania referencyjna mieszanka betonowa wykonana z cementu CEM I 52,5 R w ilości 430 kg/m^3 osiągnęła wytrzymałość na ściskanie równą $37,1 \text{ MPa}$ (rysunek 4). Redukcja ilości cementu o 60 kg/m^3 i zastosowanie domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 w ilości 4% m.c. pozwoliły na uzyskanie wytrzymałości $36,7 \text{ MPa}$, niższą zaledwie o $0,4 \text{ MPa}$ od wartości referencyjnej.

W przypadku zamiany cementu CEM I 52,5 R na CEM II/A-V 52,5 R bez redukcji ilości cementu, dodanie 4% m.c. Mapecube 1 pozwoliło osiągnąć wytrzymałość $35,2 \text{ MPa}$ – nieznacznie niższą (o $1,9 \text{ MPa}$) od referencji na CEM I.

W najbardziej wymagającym scenariuszu – zakładającym jednoczesną zamianę cementu CEM I 52,5 R na CEM II/A-V 52,5 R oraz jego redukcję – nie udało się uzyskać wytrzymałości porównywalnych z mieszanką referencyjną. Dla składu zredukowanego o 30 kg/m^3 (do 400 kg/m^3) i dodatkiem 4% Mapecube 1, uzyskano wytrzymałość $32,4 \text{ MPa}$, natomiast przy dalszej redukcji do 370 kg/m^3 wynik spadł do $29,3 \text{ MPa}$. Oznacza to, dla badanych cementów i zastosowanym dozowaniu przyspieszacza, jednoczesna zmiana typu cementu oraz ograniczenie jego ilości nie zapewniają osiągnięcia wytrzymałości na ściskanie zbliżonych do referencyjnych po 24 godzinach.

Skuteczność działania domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 maleje wraz z wydłużeniem czasu dojrzewania w temperaturze normowej. Największe różnice względem betonu referencyjnego obserwowane są po 12 i 16 godzinach, natomiast po 24 godzinach różnice w wytrzymałości między optymalizowanym składem a referencją stają się mniejsze. Może to wynikać z faktu, że mechanizm działania Mapecube 1 oparty jest głównie na przyspieszeniu początkowych reakcji hydratacyjnych cementu – co przekłada się na intensywny przyrost wytrzymałości w pierwszych kilkunastu godzinach. W miarę upływu czasu, wpływ domieszki ulega naturalnemu ograniczeniu, ponieważ tempo hydratacji staje się kontrolowane przez inne czynniki, a efekt przyspieszenia jest już w dużej mierze wykorzystany.



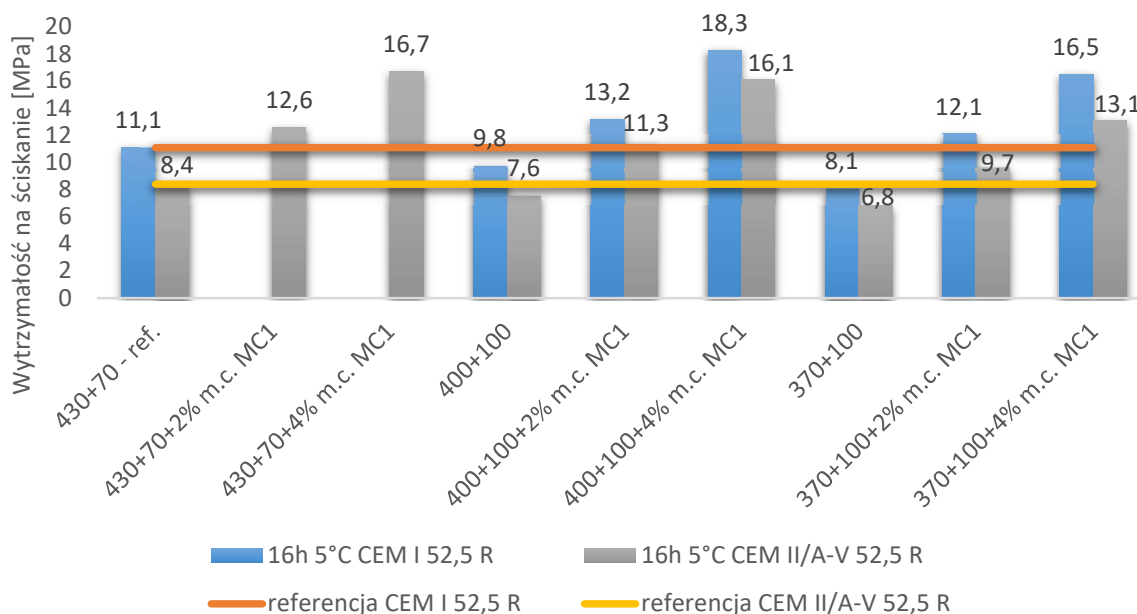
Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie po 24 godzinach dojrzewania

3.2.2 Wytrzymałości wczesne w obniżonej temperaturze

W warunkach dojrzewania w obniżonej temperaturze (5°C) referencyjna mieszanka betonowa wykonana z cementu CEM I 52,5 R w ilości 430 kg/m³ osiągnęła po 16 godzinach wytrzymałość na ściskanie równą 11,1 MPa (rysunek 5). Dodatek 2% domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 przy redukcji cementu o 60 kg/m³ pozwolił uzyskać 12,1 MPa, natomiast zwiększenie dozowania do 4% m.c. przyniosło znaczący wzrost do poziomu 16,5 MPa. Oba wyniki są wyraźnie wyższe od wyników betonu referencyjnego. Świadczy to o dużej skuteczności domieszki Mapecube w warunkach obniżonych temperatur, która standardowo spowalnia hydratację cementu.

Mieszanka referencyjna z cementem CEM II/A-V 52,5 R w ilości 430 kg/m³ uzyskała wytrzymałość 8,4 MPa, czyli o 2,7 MPa mniej niż analogiczna mieszanka na CEM I. Zastosowanie 2% m.c. Mapecube 1 poprawiło wynik do 12,6 MPa, a 4% m.c. – do 16,7 MPa, co oznacza przekroczenie poziomu referencyjnego (11,1 MPa) uzyskanego na CEM I bez dodatku domieszki. Pokazuje to, że Mapecube 1 pozwala efektywnie kompensować wolniejsze tempo narastania wytrzymałości typowe dla cementów typu CEM II w niskich temperaturach.

Zastosowanie cementu CEM II/A-V 52,5 R w ilości 370 kg/m³ z dodatkiem 4% m.c. domieszki przyspieszającej pozwoliło uzyskać 13,1 MPa, czyli o 2,0 MPa więcej od betonu referencyjnego z CEM I 52,5 R (430 kg/m³). Porównując to do wyniku tego betonu bez dodatku domieszki (6,8 MPa) przyrost wytrzymałości uzyskany na skutek jej zastosowania okazał się niemal dwukrotny.



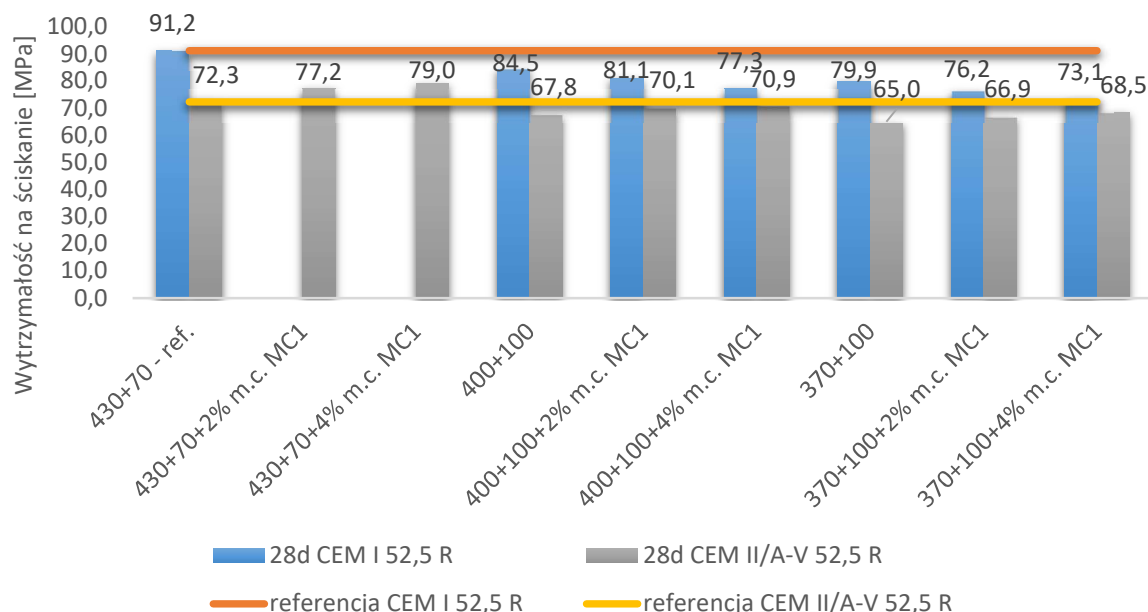
Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie po 16 godzinach dojrzewania w temperaturze 5°C.

3.2.3 Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania

Analiza wyników wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania wykazuje na wyraźny wpływ zarówno rodzaju cementu, jak i poziomu jego redukcji oraz zastosowanego dozowania domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1.

W przypadku cementu CEM I 52,5 R najwyższą wytrzymałość – aż 91,2 MPa – osiągnięto w mieszance referencyjnej bez dodatku domieszki przyspieszającej. Po optymalizacji składu, polegającej na redukcji ilości cementu do 400 i 370 kg/m³ oraz wprowadzeniu Mapecube 1 w dozowaniach 2% i 4% m.c. zaobserwowano zauważalny spadek wytrzymałości po 28 dniach. Wartości te malały wraz ze wzrostem dozowania domieszki – od 84,5 MPa przy 400 kg cementu bez domieszki, przez 81,1 MPa (2% m.c.) i 77,3 MPa (4% m.c.), aż do 76,2 MPa i 73,8 MPa przy najniższym poziomie cementu (370 kg/m³). Wydaje się, że przyspieszenie procesu hydratacji w początkowej fazie prowadzi do szybkiego przyrostu wytrzymałości, ale jednocześnie może ograniczać dalszy rozwój mikrostruktury w późniejszym czasie, co skutkuje obniżeniem potencjału wytrzymałościowego po 28 dniach. Odmienny obraz wyłania się w przypadku cementu CEM II/A-V 52,5 R. Mieszanka referencyjna osiągnęła wytrzymałość 72,3 MPa, a dodatek Mapecube 1 – odwrotnie niż w przypadku CEM I – przyniósł wzrost wytrzymałości: do 77,2 MPa przy 2% oraz do 79,0 MPa przy 4%. Oznacza to, że domieszka przyspieszająca może sprzyjać nie tylko wczesnemu twardnieniu, ale również poprawie ogólnego stopnia hydratacji cementu z dodatkiem mineralnym, co przekłada się na lepsze wyniki długoterminowe. Zagadnienie to wymaga jednak dalszych badań.

Pomimo zastosowanej optymalizacji – obniżenia ilości cementu oraz zamiany jego rodzaju na mniej emisyjny – wszystkie badane mieszanki po 28 dniach spełniają wymagania klasy wytrzymałości C50/60 wg PN-EN 206 [1], co jest poziomem wystarczającym dla zdecydowanej większości aplikacji betonu w obszarze prefabrykacji. Potwierdza to skuteczność kombinacji domieszki przyspieszającej z cementem CEM II w zrównoważonym projektowaniu mieszanek betonowych dla tego sektora.



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania

4. Obniżenie śladu węglowego betonu na skutek optymalizacji składu

W tabeli 9 zestawiono emisyjności badanych betonów obliczone na bazie deklarowanych przez producentów emisyjności zastosowanych cementów (tabela 1). Według różnych źródeł [13,14] cement odpowiada za 83-88% całego śladu węglowego betonu, dlatego dla ułatwienia obliczeń przyjęto niniejszą metodologię.

Tabela 9. Ślad węglowy badanych betonów

Cement	Emisja CO ₂ brutto [kg/m ³ betonu]		
	Referencja (430+70)	-30 kg cementu (400+100)	-60 kg cementu (370+100)
CEM I 52,5 R	349,2	324,8	300,4
CEM II/A-V 52,5 R	249,8	232,4	215,0

W tabeli 10 zestawiono najbardziej efektywne warianty składu mieszanek betonowych pod względem redukcji emisji CO₂, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych właściwości mechanicznych w określonym czasie dojrzewania (12h, 16h, 16h w 5°C oraz 24h). Za punkt odniesienia przyjęto beton referencyjny z cementem CEM I 52,5 R w ilości 430 kg/m³.

Każdy z przedstawionych wariantów optymalizacyjnych uwzględnia zastosowanie cementu CEM II/A-V 52,5 R, redukcję zawartości cementu oraz dozowanie domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 (MC1) w ilości 4% masy cementu. Kluczowym kryterium doboru było osiągnięcie porównywalnej lub wyższej wytrzymałości na ściskanie – dopuszczając jedynie niewielkie odchylenia (do ok. 2 MPa), które w warunkach produkcji mają ograniczone znaczenie praktyczne. W każdym przypadku udało się uzyskać istotne ograniczenie emisji CO₂ – od blisko 100 do ponad 130 kg/m³, co przekłada się na redukcję śladu węglowego rzędu 28–38%. Szczególnie efektywnym okazał się wariant w temperaturze obniżonej (5°C), gdzie dzięki synergii działania domieszki i optymalizacji składu, mimo niekorzystnych warunków dojrzewania uzyskano wyższe wytrzymałości niż w referencji, przy największym wskaźniku redukcji emisji (38,4%).

Tabela 10. Efektywność optymalizacji składu betonów i emisyjności przy zachowaniu właściwości użytkowych

Czas dojrzewania [godziny]	Referencja (430 kg/m ³ CEM I 52,5 R)		Optymalizacja – wariant maksymalny			Redukcja CO ₂ [kg/m ³]	Redukcja CO ₂ [%]
	f _c [MPa]	Emisja [kg/m ³]	Wariant betonu	f _c [MPa]	Emisja [kg/m ³]		
12h	19,8	349,2	CEM II 370+100 4% m.c. MC1	18,9	215,0	134,2	38,4
16h	27,5		CEM II 400+100 4% m.c. MC1	26,3	232,4	116,8	33,4
16h 5°C	11,1		CEM II 370+100 4% m.c. MC1	13,1	215,0	134,2	38,4
24h	37,1		CEM II 430+70 4% m.c. MC1	35,2	249,8	99,4	28,5

5. Podsumowanie i wnioski

W artykule opisano możliwości ograniczenia emisji CO₂ w produkcji betonów na potrzeby sektora prefabrykacji poprzez zastosowanie domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 oraz optymalizację składu mieszanek betonowych. Rosnące znaczenie prefabrykacji w Polsce wiąże się z potrzebą szybkiego tempa realizacji inwestycji i wysokiej jakości wykonania, jednak dotychczasowe podejście, polegające na stosowaniu dużych ilości cementu portlandzkiego CEM I, generuje wysoki ślad węglowy oraz niepotrzebne „przeprojektowanie” mieszanek w przypadku docelowej klasy wytrzymałości na ściskanie.

W badaniach przeanalizowano różne warianty betonów wykonanych na bazie cementów CEM I 52,5 R oraz CEM II/A-V 52,5 R, w tym z zastosowaniem domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 w ilości 2% i 4% masy cementu. Sprawdzano wpływ tych modyfikacji na wytrzymałość betonu po 12, 16 i 24 godzinach dojrzewania oraz po 28 dniach, a także w warunkach obniżonej temperatury (5°C). Wyniki wykazały, że Mapecube 1 istotnie przyspiesza przyrost wytrzymałości wczesnej, szczególnie w pierwszych 16 godzinach, co ma kluczowe znaczenie dla efektywności procesów na zakładach prefabrykacji.

Zastosowanie Mapecube 1 pozwoliło na redukcję ilości cementu nawet o 60 kg/m³ bez utraty parametrów wytrzymałościowych (wczesnych), a w niektórych przypadkach osiągnięto lepsze wyniki niż w betonie referencyjnym. Co istotne, domieszka skutecznie kompensowała wolniejszy przyrost wytrzymałości charakterystyczny dla cementów CEM II w porównaniu do cementów CEM I, umożliwiając ich zastosowanie bez strat technologicznych.

Skuteczność domieszki Mapecube 1 maleje wraz z wydłużaniem czasu dojrzewania betonu. Największy wpływ na przyrost wytrzymałości obserwowany był w ciągu pierwszych 12–16 godzin, co potwierdza jej efektywne działanie w fazie wczesnego twardnienia. W miarę

postępu procesu hydratacji różnice w wytrzymałościach pomiędzy betonami z domieszką a mieszanką referencyjną stają się coraz mniejsze.

Analiza wytrzymałości po 28 dniach wykazała, że w przypadku cementu CEM I wprowadzenie Mapecube 1 może prowadzić do lekkiego spadku wytrzymałości końcowej, co prawdopodobnie wynika z szybkiej inicjalizacji hydratacji, ograniczającej dalszy rozwój mikrostruktury. Odwrotnie było w przypadku cementu CEM II – tam domieszka nie tylko przyspieszała twardnienie, ale także poprawiała końcową wytrzymałość, co może świadczyć o korzystnej aktywacji nieklinkierowych składników głównych cementu przez Mapecube 1. Wymaga to jednak dalszych badań.

W warunkach obniżonej temperatury domieszka wykazała szczególną skuteczność – betony z jej dodatkiem osiągały wyższe wytrzymałości niż beton referencyjny, nawet przy zmniejszonej ilości cementu. To ważne z punktu widzenia prefabrykacji w okresach obniżonych temperatur lub w nieogrzewanych halach produkcyjnych.

Pod względem środowiskowym przeprowadzona optymalizacja pozwoliła na redukcję śladu węglowego betonu o 28–38%, głównie dzięki obniżeniu ilości cementu i zastosowaniu cementu o niższej emisyjności (CEM II/A-V). Każda z optymalizowanych mieszanek spełniała wymagania wytrzymałościowe dla klasy C50/60 według normy PN-EN 206, co jest klasą wystarczającą dla większości aplikacji w segmencie prefabrykacji.

Podsumowując, zastosowanie domieszki przyspieszającej Mapecube 1 w połączeniu z cementem CEM II i redukcją wyjściowej zawartości cementu stanowi skuteczne narzędzie w dążeniu do bardziej zrównoważonej prefabrykacji. Umożliwia ono ograniczenie kosztów, zwiększenie efektywności produkcji, a przede wszystkim – istotne zmniejszenie emisji dwutlenku węgla przy zachowaniu wymaganych właściwości mieszanki betonowej i betonu stwardniałego.

6. Bibliografia

- [1] *PN-EN 206+A2:2021-08 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.*
- [2] *PN-B-06265:2022-08 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie normy PN-EN 206+A2:2021-08.*
- [3] *PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.*
- [4] W. Kiernożycki, *Betonowe konstrukcje masywne*. Kraków: Polski Cement, 2003.
- [5] J. F. Daczko, *Self-Consolidating Concrete: Applying What We Know*, CRC Press, 2012.
- [6] *PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu.*
- [7] *PN-EN 931-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1: Określanie uziarnienia.*
- [8] *PN-EN 197-1:2012 Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.*
- [9] *PN-EN 12350-6:2019-08 Badania mieszanki betonowej -- Część 6: Gęstość.*
- [10] *PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej -- Część 7: Badanie zawartości powietrza -- Metody ciśnieniowe.*
- [11] *PN-EN 12350-8:2019-08 – Badania mieszanki betonowej – Część 8: Badanie rozplywu betonu samozagęszczalnego (SCC).*
- [12] *PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu -- Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.*

-
- [13] Irfan M., *Carbon footprint of ready mix concrete and the role of environmental classification systems*, *ESA Report No. 2011:16*, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011
- [14] J.R. Prusinski, M.L. Marceau, M.G. Vangeem, *Life cycle inventory of slag cement concrete*, Eighth CANMET/ACI Int. Conf. Fly Ash, Silica Fume, Slag, Nat. Pozzolans Concr. (2004) 1–33.