



Politechnika Śląska
Wydział Budownictwa
Członek Europejskiego Stowarzyszenia Wydziałów Budownictwa

Katedra Procesów Budowlanych i Fizyki Budowli

ROZPRAWA DOKTORSKA

Kształtowanie składu współczesnego betonu dla potrzeb budownictwa z uwzględnieniem wymagań ekologicznych

Karol Wandoch

Promotor:

prof. dr hab. inż. Zbigniew Giergiczny

Promotor pomocniczy:

dr inż. Artur Golda

Gliwice, 2022

Składam serdeczne podziękowania:

*promotorowi prof. dr hab. inż. Zbigniewowi Giergicznemu
za okazaną pomoc, życzliwość, zaangażowanie, wskazówki i cierpliwość*

*promotorowi pomocniczemu dr inż. Arturowi Goldzie
za cenne spostrzeżenia i uwagi.*

*Wszystkim koleżankom i kolegom z Centrum Technologicznego Betotech Sp. z o.o.
w Dąbrowie Górniczej oraz z oddziału w Choruli
za okazaną pomoc podczas realizacji programu badań.*

Marcie, Hani oraz Rodzicom dziękuję za wsparcie, wyrozumiałość i cierpliwość.

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE.....	5
SUMMARY.....	6
1. WPROWADZENIE.....	7
2. CEL I ZAKRES PRACY.....	9
3. STUDIUM LITERATUROWE.....	10
3.1. Poziom emisji CO ₂ przy produkcji klinkieru portlandzkiego, cementu i betonu.....	10
3.2. Normowe i specyfikacyjne uwarunkowania stosowania cementów oraz betonów niskoemisyjnych w budownictwie.....	17
3.2.1. Oddziaływanie środowiska – klasy ekspozycji wg PN-EN 206.....	17
3.2.2. Zasady uwzględniania dodatków typu II w składzie betonu wg PN-EN 206.....	23
3.2.3. Stosowanie betonów z użyciem cementów wieloskładnikowych w budownictwie.....	25
3.3. Czynniki ograniczające szerokie stosowanie cementów niskoemisyjnych w budownictwie.....	38
3.4. Podsumowanie części literaturowej.....	48
4. BADANIA WŁASNE.....	49
4.1. Składniki badanych cementów.....	49
4.1.1. Popiół lotny krzemionkowy.....	49
4.1.2. Zmielony granulowany żużel wielkopiecowy.....	50
4.1.3. Wapień.....	50
4.1.4. Nośniki klinkieru portlandzkiego.....	51
4.2. Składniki badanych betonów.....	53
4.2.1. Cement z prób przemysłowych.....	53
4.2.2. Kruszywo.....	55
4.2.3. Popiół lotny.....	58
4.2.4. Pył krzemionkowy.....	59
4.2.5. Domieszki.....	59
4.2.5 Woda.....	60
4.3. Właściwości cementów niskoemisyjnych.....	60
4.3.1. Właściwości cementów przygotowanych w warunkach laboratoryjnych.....	61

4.3.2. Właściwości cementów niskoemisyjnych z prób przemysłowych.....	68
4.4.3. Wpływ rodzaju zastosowanego cementu niskoemisyjnego na reologię zapraw	73
4.5. Właściwości betonów z zastosowaniem cementów niskoemisyjnych.....	76
4.5.1. Cementy niskoemisyjne w składzie betonu zwykłego	77
4.5.2. Możliwości zastosowania cementów niskoemisyjnych w prefabrykacji	89
4.5.3. Beton wysokowytrzymałościowy	94
4.5.4. Beton samozagęszczalny	100
4.5.5. Beton masywny	105
4.6. Aspekty ekologiczne związane ze stosowaniem cementów niskoemisyjnych	108
4.6.1. Radioaktywność cementów wieloskładnikowych	108
4.6.2. Emisyjność cementów wieloskładnikowych	109
4.6.3. Emisyjność badanych betonów	112
5. Podsumowanie	116
6. Wnioski	120
7. Bibliografia	122

STRESZCZENIE

Niniejsza rozprawa podejmuje problematykę związaną z kształtowaniem składu współczesnego betonu z uwzględnieniem wymagań ekologicznych. Ograniczenie zużycia nieodnawialnych surowców naturalnych oraz redukcja poziomu emisji pyłów i gazów cieplarnianych do atmosfery (głównie CO₂) towarzyszącej produkcji cementu są działaniami niezbędnymi dla osiągnięcia neutralności klimatycznej przemysłu cementowego. Obecnie najbardziej efektywnym kierunkiem ograniczenia poziomu emisji CO₂ przy produkcji cementu jest zastąpienie w jego składzie klinkieru portlandzkiego (K), nieklinkierowymi składnikami głównymi. W Polsce, jako nieklinkierowe składniki główne cementu, najczęściej wykorzystuje się przemysłowe produkty uboczne: granulowany żużel wielkopiecowy (S) oraz popiół lotny krzemionkowy (V). Ograniczona dostępność granulowanego żużla wielkopiecowego (S) oraz popiołu lotnego krzemionkowego (V) na rynku krajowym powoduje coraz szersze zainteresowanie stosowaniem wapienia (LL, L) jako składnika głównego cementu.

Przeprowadzone w rozprawie studium literaturowe opisuje stan wiedzy oraz wymagania związane z zastosowaniem cementów niskoemisyjnych w składzie betonu. Przedstawiono również przykłady zastosowań cementów niskoemisyjnych w budownictwie oraz przeanalizowano czynniki ograniczające możliwości ich szerszego zastosowania w niektórych obszarach budownictwa.

W części badawczej rozprawy określono właściwości cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C-M(S-LL) i CEM II/C-M(S-V) oraz cementu wieloskładnikowego CEM VI (S-V) otrzymanych w warunkach laboratoryjnych i wyprodukowanych w instalacjach przemysłowych. Przeanalizowano wpływ obniżonego stosunku w/c oraz temperatury dojrzewania na właściwości cementów trójskładnikowych. Ocenie poddano możliwości zastosowania cementów niskoemisyjnych w betonie zwykłym, w betonie przeznaczonym dla prefabrykacji, w betonach nowej generacji: betonie samozagęszczalnym (SCC) oraz betonie wysokowytrzymałościowym (BWW), a także w betonie mrozoodpornym oraz betonie masywnym. W badaniach, jako cementy referencyjne, stosowano cementy portlandzkie CEM I oraz cement hutniczy CEM III/A. Zwrócono uwagę także na aspekty środowiskowe związane ze stosowaniem cementów niskoemisyjnych, zwłaszcza poziom emisji CO₂.

Uzyskane wyniki badań własnych i ich analiza pokazała, iż przy odpowiednim ukształtowaniu składu betonu oraz wykorzystaniu obecnie dostępnych efektywnych domieszek, cementy niskoemisyjne (wieloskładnikowe) mogą być z powodzeniem stosowane w wielu obszarach budownictwa, w których dominują cementy portlandzkie CEM I oraz cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEMII/A,B.

SUMMARY

This dissertation considers the issues related to the shaping of the composition of modern concrete, taking into account ecological requirements. Limiting the consumption of non-renewable natural resources and reducing the level of dust and greenhouse gas emissions, mainly CO₂, accompanying cement production are measures necessary to achieve climate neutrality of the cement industry. Currently, the most effective way to reduce CO₂ emissions in cement production is to replace Portland clinker (K) with non-clinker main components in its composition. In Poland, the most commonly used non-clinker main components of cement are industrial by-products: granular blast furnace slag (S) and silica fly ash (V). Limited availability of granulated blast furnace slag (S) and silica fly ash (V) on the domestic market causes increasing use of limestone (LL, L) as a non-clinker component of the main cement.

The study conducted in the dissertation describes the information and requirements related to the use of low-emission cements. The dissertation presents examples of innovative applications of low-emission cements and analysis of the factors limiting their wide application in construction.

In the research part of the dissertation, the influence of non-clinker main components on the properties of cement in the three-component systems K-S-LL, K-V-LL and K-S-V was analyzed. The possibility of shaping the properties of Portland ternary cements CEM II/C-M(S-LL) and CEM II /C-M(S-V) and ternary cement CEM VI (S-V) produced in industrial conditions was assessed. The influence of the lowered w/c ratio and the maturation temperature on the properties of the above cements was determined. The possibilities of using the above-mentioned low-emission cements in ordinary concrete, in concrete intended for prefabrication, in: self-compacting concrete (SCC) and high-strength concrete (BWW), as well as in frost-resistant and massive concrete, was assessed. In the research as reference cements were used Portland cements CEM I and metallurgical cement CEM III/A. Attention was paid to the environmental aspects related to the use of low-emission cements, especially the level of CO₂ emissions.

The obtained test results prove that with the appropriate shaping of the concrete composition and the use of currently available admixtures, low-emission multi-component cements can be successfully used in many areas of civil engineering, where so far Portland cements CEM I and multi-component Portland cements CEM II/A, B have dominated.

1. WPROWADZENIE

Beton jest i w najbliższej przyszłości pozostanie podstawowym materiałem budowlanym [24]. Powszechne stosowanie betonu w budownictwie wynika z jego licznych zalet takich jak: odpowiednia urabialność mieszanki betonowej w długim czasie, możliwość formowania skomplikowanych kształtów, właściwości mechaniczne (głównie wytrzymałość na ściskanie), możliwości kształtowania użytkowych cech technicznych, wysokiej trwałości, dobrej współpracy ze stalą zbrojeniową, ognioodporności oraz możliwość praktycznie pełnego recyklingu. Szerokie stosowanie betonu jest związane także z powszechną dostępnością surowców do jego produkcji oraz konkurencyjną ceną w porównaniu z alternatywnymi rozwiązaniami materiałowo-konstrukcyjnymi [1,82,94].

Produkcja cementu portlandzkiego w Polsce w roku 2020 wyniosła ponad 18,7 mln Mg [98]. Wytwarzanie klinkieru portlandzkiego, podstawowego składnika cementu, wiąże się z wysokim poziomem emisji dwutlenku węgla do atmosfery oraz stosowaniem nieodnawialnych surowców naturalnych. Wyprodukowanie 1 Mg klinkieru portlandzkiego powoduje powstanie około 800÷846 kg CO₂ [87]. Światowa produkcja cementu w roku 2020 wyniosła 4,1 mld Mg [99]. Szacuje się, że przemysł cementowy odpowiada za około 5% całkowitej emisji CO₂ generowanej przez człowieka [10]. Zgodnie z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu, ogłoszonego w grudniu 2019 roku, zakłada się osiągnięcie neutralności klimatycznej sektora cementu i betonu do roku 2050 [64,73]. Dlatego też m.in. rozpoczęto prace normalizacyjne mające na celu wprowadzenie nowych rodzajów cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C-M oraz grupę cementów wieloskładnikowych CEM VI [100]. Są to cementy wieloskładnikowe niskoemisyjne, o znacznie ograniczonej zawartości klinkieru portlandzkiego, w składzie których zastosowanie znajdują głównie trójskładnikowe kompozycje klinkieru portlandzkiego z popiołem lotnego krzemionkowego (V) i granulowanym żużlem wielkopiecowym (S) oraz wapienia (LL) z popiołem (V) lub wapienia (LL) z granulowanym żużlem wielkopiecowym (S). Właściwości takich cementów są efektem synergicznego oddziaływania poszczególnych składników na właściwości cementu i betonu [27,55,81]. Jednakże, jak pokazuje praktyka budowlana, szersze stosowanie w budownictwie cementów niskoemisyjnych napotyka na duże trudności ze strony specyfikujących oraz nadzoru budowlanego związane z obawami o uzyskanie odpowiednich właściwości wytrzymałościowych i trwałościowych konstrukcji i obiektów budowlanych [22,28].

Współczesne budownictwo stawia coraz większe wymagania związane z właściwościami mieszanki betonowej oraz betonu stwardniałego. Oprócz, wymagań wytrzymałościowych i trwałościowych, istotne są również właściwości reologiczne mieszanki betonowej, dynamika rozwoju wytrzymałości, wymagany okres pielęgnacji, a często również walory estetyczne powierzchni betonu. Rosnące wymagania środowiskowe, dążące do minimalizacji śladu węglowego generowanego przez producentów cementu i betonu, wymuszają poszukiwanie nowych rozwiązań materiałowo-technologicznych. Ich celem ma być rozszerzenie możliwości stosowania cementów wieloskładnikowych w obszarach budownictwa w których obecnie

dominują cementy z wyższą zawartością klinkieru portlandzkiego, głównie cementy portlandzkie CEM I oraz cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II /A,B.

Wymagania dotyczące ograniczenia emisji CO₂, prace normalizacyjne związane z wprowadzeniem nowych rodzajów cementów wieloskładnikowych, a także rozwój technologiczny współczesnych domieszek do betonu, skłoniły autora niniejszej rozprawy do realizacji programu badawczego mającego na celu pokazanie szerszych możliwości aplikacji cementów niskoemisyjnych w budownictwie.

2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem niniejszej rozprawy jest określenie możliwości szerszej aplikacji w budownictwie cementów niskoemisyjnych. Cementy niskoemisyjne to cementy zawierające w swoim składzie powyżej 35% innych składników głównych niż klinkier portlandzki. Do tego rodzaju cementów zaliczamy: cementy hutnicze CEM III/A,B,C, pucolanowe CEM IV/B, cementy wieloskładnikowe CEM V/A,B spełniające wymagania normy PN-EN 197-1:2012 [93], jak i nowe rodzaje cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C i cementy wieloskładnikowe CEM VI spełniające wymagania nowej normy europejskiej EN 197-5 [100].

Teza pracy: współczesna technologia betonu pozwala na szersze stosowanie w budownictwie cementów niskoemisyjnych wieloskładnikowych. Beton wykonany z cementu niskoemisyjnego wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju spełniając jednocześnie rosnące wymagania branży budowlanej. Jest także działaniem proekologicznym: niższa emisja CO₂ w produkcji cementu i betonu, szersze stosowanie w składzie cementu i betonu ubocznych produktów przemysłowych (popioły lotne, żużel wielkopiecowy) oraz oszczędność naturalnych nieodnawialnych zasobów surowcowych.

Zakres rozprawy obejmuje studium literaturowe opisujące wymagania formalno-prawne (normy, specyfikacje techniczne, warunki wykonania i odbioru robót budowlanych) związane z zastosowaniem cementów niskoemisyjnych w składzie betonu, ocenę właściwości cementów niskoemisyjnych oraz proponowane kierunki zastosowań tych cementów w obszarach budownictwa zdominowanych przez cement portlandzki CEM I i cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A,B.

W części doświadczalnej niniejszej rozprawy przedstawiono wyniki badań własnych obejmujących swoim zakresem: właściwości cementów niskoemisyjnych oraz właściwości zaprojektowanych i wykonanych z ich użyciem betonów: zwykłego, masywnego, wysokowytrzymałościowego BWW oraz samozagęszczalnego SCC. Pokazano także możliwości kształtowania betonu mrozoodpornego oraz betonu przeznaczonego do produkcji elementów prefabrykowanych z użyciem cementów niskoemisyjnych.

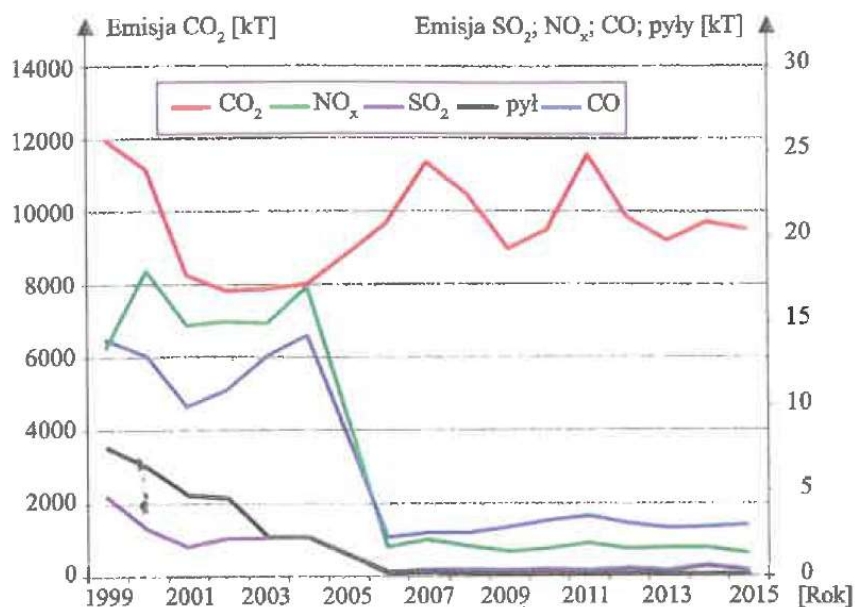
Dokonano także analizy ekologicznej proponowanych rozwiązań z uwzględnieniem emisyjności i efektywności wykorzystania klinkieru cementowego. Zwrócono także uwagę na poziom radioaktywności cementów niskoemisyjnych zawierających w swoim składzie składniki z wysokotemperaturowych procesów przemysłowych (popiół lotny, granulowany żużel wielkopiecowy).

3. STUDIUM LITERATUROWE

Studium literaturowe zorientowane zostało na analizę czynników wpływających na poziom emisyjności współczesnego betonu, aspekty formalno-prawne warunkujące stosowanie cementów niskoemisyjnych w budownictwie, a także aktualne ograniczenia szerszego stosowania cementów niskoemisyjnych wynikające z oczekiwań współczesnego budownictwa.

3.1. Poziom emisji CO₂ przy produkcji klinkieru portlandzkiego, cementu i betonu

Produkcja podstawowego składnika cementu, klinkieru portlandzkiego, jest związana z emisją gazów cieplarnianych (głównie CO₂), pyłów oraz stosowaniem znacznych ilości nieodnawialnych surowców naturalnych [64,71]. Zużycie energii cieplnej na wyprodukowanie 1 Mg klinkieru portlandzkiego wynosi ok. 3,4 GJ. Szacuje się, że poziom emisji CO₂ przy produkcji klinkieru portlandzkiego wynosi ok. 800÷846 kg/Mg [87]. Na rys. 1 przedstawiono poziom emisji gazów i pyłów przemysłu cementowego w Polsce w latach 1999-2015 [4].

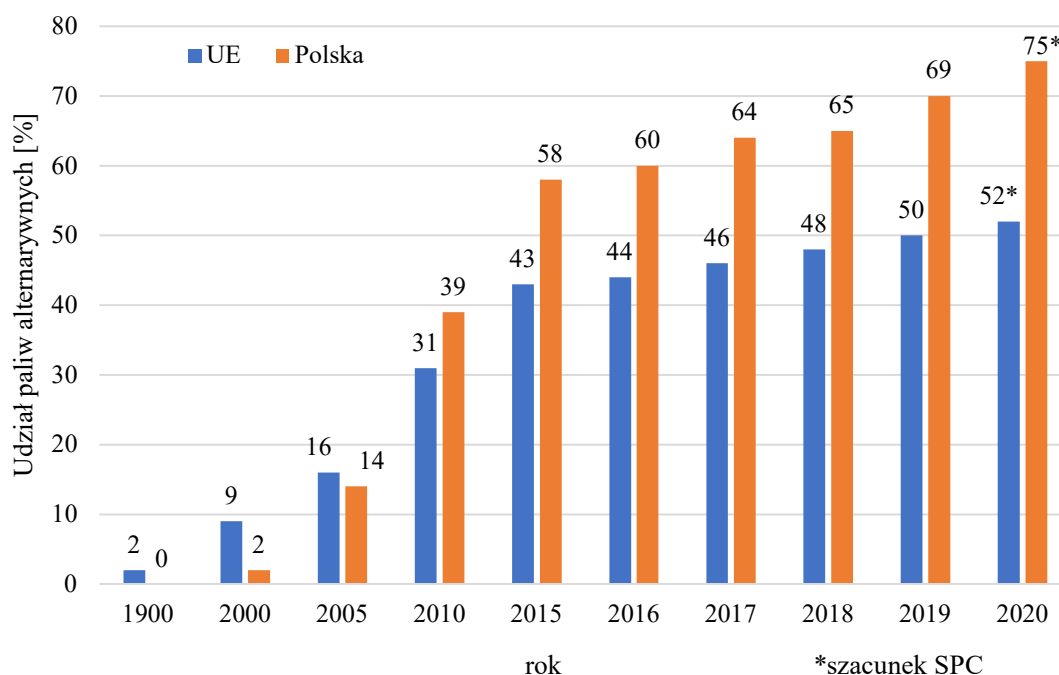


Rys.1. Emisja gazów i pyłów w przemyśle cementowym w Polsce w latach 1999-2015 [4]

Modernizacja przemysłu cementowego w Polsce w latach 2004-2006 doprowadziła do znacznego obniżenia emisji NO_x, SO₂, CO oraz pyłów. Szacuje się, że poziom emisji CO₂ przy produkcji klinkieru portlandzkiego w kraju wynosi ok. 800 kg/Mg [85]. Krajowy przemysł cementowy emituje ok. 11mln Mg dwutlenku węgla CO₂. Jest to związane z faktem, iż tylko ok. 40% emisji CO₂ przy produkcji klinkieru portlandzkiego pochodzi ze spalania paliwa technologicznego, pozostałe 60% emisji pochodzi z termicznego rozkładu węglanu wapnia (zawartego w surowcach wapiennych), głównego składnika namiaru surowcowego do produkcji klinkieru cementowego. Jest to tzw. emisja procesowa [4]. Ograniczanie emisji związanej ze spalaniem paliwa jest możliwe dzięki zmniejszeniu jednostkowego zużycia ciepła, a także poprzez szerokie stosowanie paliw zastępczych (alternatywnych) w tym biopaliw, natomiast ograniczenie emisji CO₂ powstającej z rozkładu węglanu wapnia jest obecnie utrudnione ze względu na wysokie

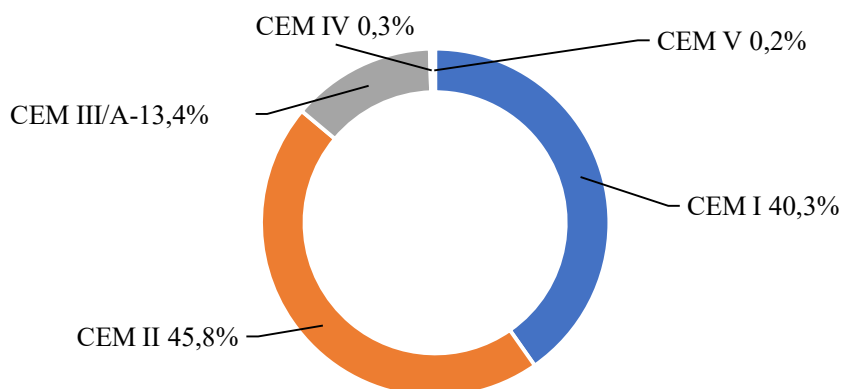
zapotrzebowanie na cement, jak i brak surowców alternatywnych niewęglanowych [4]. W przyszłości sytuację tą może zmienić rozwój technologii sekwestracji CO₂, czyli wychwytywania dwutlenku węgla ze spalin i jego bezpieczne deponowanie w skorupie ziemskiej (Carbon Capture and Storage) lub wykorzystywanie w innych branżach przemysłowych (Carbon Capture and Usage).

Krajowy przemysł cementowy od lat dąży do ograniczenia zużycia węgla kamiennego jako źródła energii cieplnej niezbędnej do wypału klinkieru portlandzkiego i szerszego stosowania paliw alternatywnych. W Polsce udział ciepła pozyskiwanego z paliw alternatywnych w ostatnich latach znacznie wzrósł i w roku 2020 sięgnął poziomu 75% (rys.2) [9]. Udział ten jest znacznie wyższy niż średnie stosowanie paliw alternatywnych w krajach Unii Europejskiej. Około 90% stosowanych paliw alternatywnych w Polsce stanowi RDF (paliwo z przetwarzania części palnych odpadów komunalnych). Jako składniki paliw stosuje się również zużyte opony, tworzywa sztuczne, gumę oraz osady ściekowe.



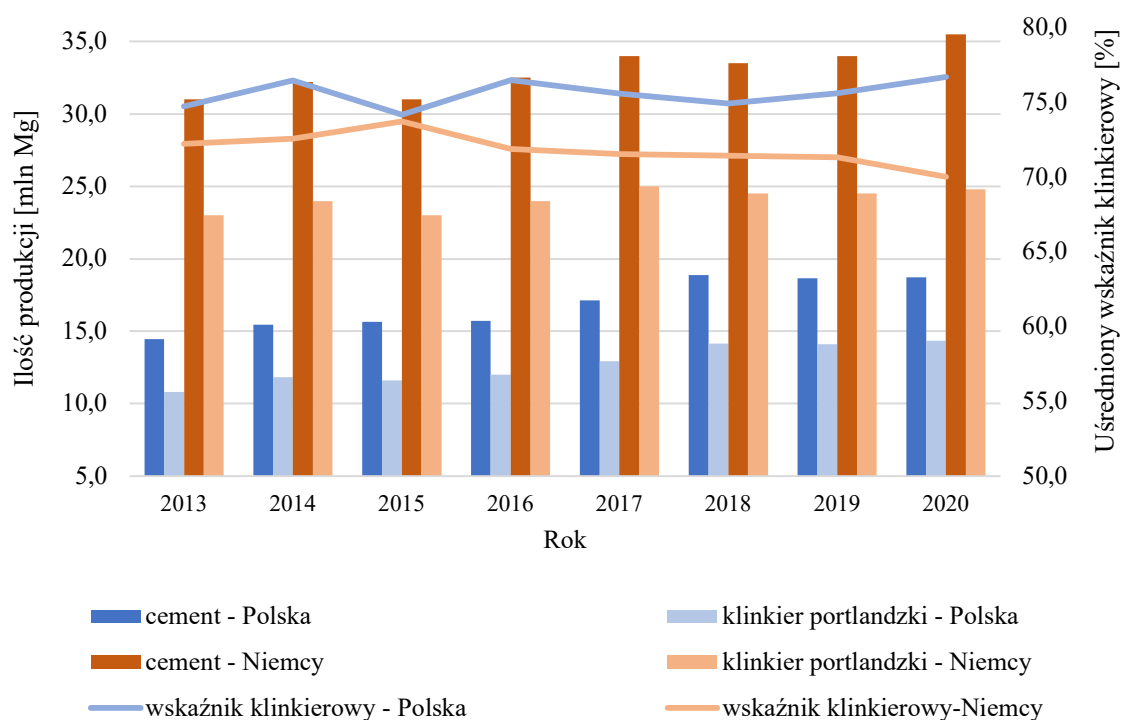
Rys.2. Udział paliw alternatywnych w produkcji klinkieru portlandzkiego [9]

Istotnym kierunkiem mającym na celu redukcję emisji CO₂ do atmosfery jest ograniczenie zawartości klinkieru portlandzkiego w składzie cementu. Realizowane to jest poprzez produkcję cementów wieloskładnikowych CEM II÷CEM VI. Na rys. 3 przedstawiono strukturę asortymentową produkowanych w Polsce cementów w roku 2020.



Rys. 3. Struktura asortymentowa cementów w Polsce w roku 2020 [9]

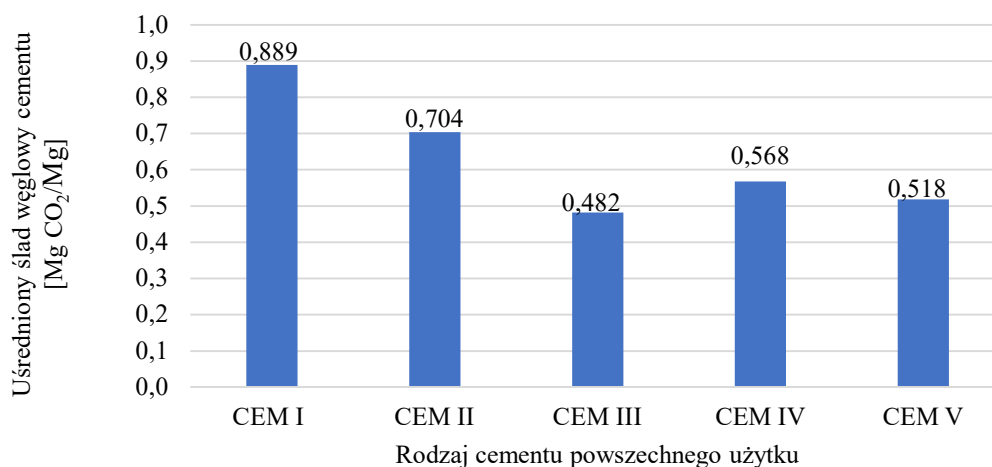
W 2020 r. blisko 60% wyprodukowanego w Polsce cementu stanowił cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II wraz z cementem hutniczym CEM III, co świadczy o ich przydatności w budownictwie [9]. Łączna ilość wyprodukowanego cementu w latach 2013÷2020 jest o około 25% większa od ilości wyprodukowanego klinkieru portlandzkiego. Dlatego też, w ostatnich latach uśredniony wskaźnik klinkierowy produkowanego w Polsce cementu wynosił ponad 75%. Jest on jednak znacznie wyższy niż w innych krajach europejskich, np. w sąsiednich Niemczech, gdzie w roku 2020 wyniósł około 70% (rys. 4).



Rys. 4. Produkcja klinkieru portlandzkiego i cementu w Polsce oraz w Niemczech w latach 2013÷2020 wraz z uśrednionym wskaźnikiem klinkierowym [96,98,101]

Wzrost wskaźnika klinkierowego w latach 2018÷2020 w Polsce jest związany z realizacją wielu projektów infrastrukturalnych na potrzeby których stosuje się głównie cement portlandzki CEM I, oraz z renesansem prefabrykacji, zwłaszcza w budownictwie mieszkaniowym. Wysoki poziom uśrednionego wskaźnika klinkierowego w Polsce świadczy o ograniczonym wykorzystywaniu cementów niskoemisyjnych, co wskazuje na zasadność badań własnych podjętych w ramach niniejszej rozprawy.

Ze względu na zróżnicowaną zawartość klinkieru portlandzkiego w składzie poszczególnych rodzajów cementów, poziom emisji CO₂ związany z ich produkcją jest różny [34]. Uśredniony ślad węglowy, w zależności od rodzaju cementu produkowanego w Polsce w roku 2017, przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Uśredniony ślad węglowy cementów produkowanych w Polsce w roku 2017 [42]

Najniższym poziomem emisji CO₂ charakteryzuje się cement hutniczy CEM III oraz cement wieloskładnikowy CEM V. Niestety, zgodnie z danymi przedstawionymi na rys. 3, stanowią zaledwie 13,6% krajowej produkcji cementu. Rozszerzenie zakresu stosowania tych rodzajów cementów w budownictwie daje istotne możliwości do ograniczenia emisyjności krajowego przemysłu cementowego. Jednakże realizacja tego celu jest znacznie utrudniona ze względu na ograniczoną dostępność, głównie granulowanego żużla wielkopiecowego na rynku krajowym.

Prowadzone przez Europejski Komitet Normalizacyjny prace normalizacyjne związane z rozszerzeniem asortymentu niskoemisyjnych cementów doprowadziły do ustanowienia w lipcu 2021 nowej normy EN 197-5:2021-07 [100]. Norma ta zakłada zwiększenie dopuszczalnej ilości nieklinkierowych składników głównych cementu, wprowadzając nowe rodzaje cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C oraz cementów wieloskładnikowych CEM VI. W tabeli 1 przedstawiono normowe składy cementów CEM II/C oraz CEM VI (tabela1) [100].

Tabela 1. Skład cementów według EN 197-5 [100]

Główne rodzaje cementu	Nazwa rodzaju cementu powszechnego użytku		Skład [% masy] ^a										Składniki drugorzędne
			Składniki główne										
			Klinkier	Żużel wielkopięcowy	Pył krzemionkowy	Pucolana		Popiół lotny		Łupek palony	Wapień		
						naturalna	naturalna wypalana	krzemionkowy	wapienny				
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L ^c	LL ^c				
CEM II	Cement portlandzki wieloskładnikowy ^d	CEM II/C-M	50-64	36-50									0-5
CEM VI	Cement wieloskładnikowy	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5

a - Wartości w tablicy odnoszą się do sumy składników głównych i składników drugorzędnych

b - Udział pyłu krzemionkowego jest ograniczony do 10% masy

c - Udział wapienia jest ograniczony do 6-20 % masy

d - Liczba składników głównych innych niż klinkier jest ograniczona do dwóch i składniki te powinny być deklarowane przez oznaczenie cementu

W grupie cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C łączna zawartość nieklinkierowych składników głównych cementu może wynosić do 50%. Grupa cementów CEM VI, w której łączna zawartość nieklinkierowych składników głównych cementu może wynieść do 65%, przyjęła nazwę „cementu wieloskładnikowego”. Obecnie Europejski Komitet Normalizacyjny prowadzi prace nad normą prEN 197-6:2021 [102], wprowadzającą cementy CEM II/ A-R dopuszczające zastosowanie pyłu z recyklingu betonu jako składnika głównego cementu w ilości do 20% masy. Proponowane składy przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Cementy według projektu normy EN 197-6 [102]

Główne rodzaje cementu	Nazwa rodzaju cementu powszechnego użytku		Skład [% masy] ^a											Składniki drugorzędne
			Składniki główne											
			Klinkier	Pył z recyklingu betonu RCP	Żużel wielkopiecowy	Pył krzemionkowy	Pucolana		Popiół lotny		Łupek palony	Wapień		
							naturalna	wypalana	krzemionkowy	wapienny				
K	R	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L ^c	LL ^c				
CEM II	Cement portlandzki z pyłem RCP	CEM II/A-R	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM VI	Cement portlandzki wieloskładnikowy ^d	CEM II/A-M	80-88	6-14	6-14								0-5	
		CEM II/B-M	65-79	6-20	6-29								0-5	
		CEM II/C-M	50-64	6-20	16-44								0-5	

a - Wartości w tablicy odnoszą się do sumy składników głównych i składników drugorzędnych

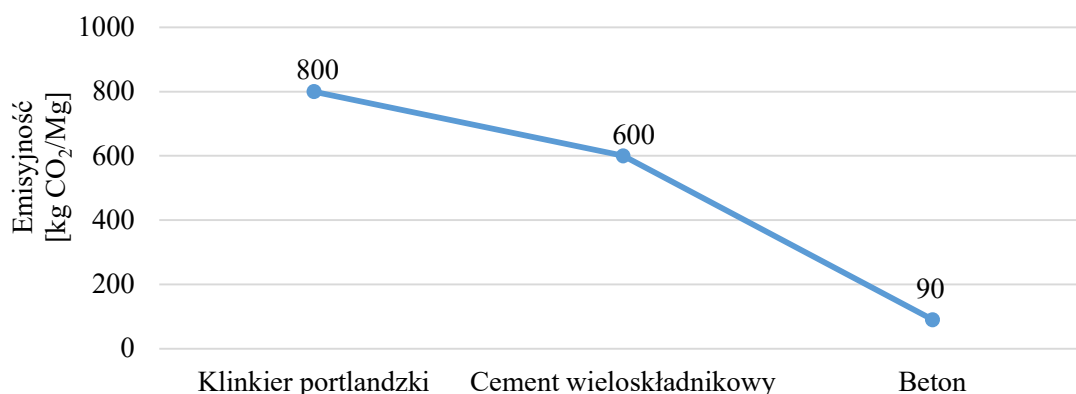
b - Udział pyłu krzemionkowego jest ograniczony do 10% masy

c – Udział sumy wapienia oraz pyłu z recyklingu betonu (RCP) jest ograniczony do 6-20 % masy

d - Liczba składników głównych innych niż klinkier jest ograniczona do dwóch i składniki te powinny być deklarowane przez oznaczenie cementu

Cementy wieloskładnikowe CEM IIC÷CEM VI charakteryzują się wolnym przyrostem wytrzymałości we wczesnym okresie dojrzewania, co jest związane z obniżeniem zawartości w ich składzie najbardziej aktywnego składnika jakim jest klinkier portlandzki. Jednak wczesna wytrzymałości betonu zależy od wielu czynników do których, oprócz zawartości klinkieru portlandzkiego, zaliczyć można: powierzchnię właściwą cementu, zawartość i rodzaj regulatora czasu wiązania oraz zawartość składników innych niż klinkier portlandzki, a także stosunek wodno-cementowy, temperaturę dojrzewania oraz rodzaj zastosowanych domieszek [71,78–80].

Produkcja 1 Mg betonu wiąże się z emisyjnością (śladem węglowym) na poziomie znacznie niższym niż w przypadku klinkieru portlandzkiego, czy cementu. Jest to związane z dużym udziałem w objętości betonu składników, których produkcja charakteryzuje się obniżoną emisyjnością, głównie kruszywa drobnego, kruszywa grubego i wody. W typowych zastosowaniach betonu składniki te stanowią ok. 80% objętości betonu. Zależność pomiędzy emisyjnością procesu produkcji klinkieru portlandzkiego, cementu oraz betonu przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Zmiana emisyjności w cyklu produkcji betonu [97]

Wybór rodzaju użytego cementu jest najistotniejszym czynnikiem wpływającym na ślad węglowy betonu. Poziom redukcji emisyjności betonu wynikający jedynie ze zmiany użytego rodzaju cementu przedstawiono w tabeli 3. Zestawienie wykonano na podstawie wyników zamieszczonych w pracy [39].

Tabela 3. Zestawienie właściwości betonów i emisyjności [39]

Klasa wytrzymałości betonu	C30/37		C35/45		C40/50		C50/60	
Rodzaj cementu	CEM I	CEM III	CEM I	CEM III	CEM I	CEM II	CEM I	CEM II
Przeznaczenie w konstrukcji	ławy fundamentowe, podpory, rygle, ławy ram, korpusy przyczółków,				filary, podpory, ustroje nośne, kapy chodnikowe, pomosty, przęsła			
Klasy ekspozycji	XC4, XA1, XD1, XF2		XC4, XA3, XD1, XF2		XC4, XD3, XF4, XA1		C4, XD3, XF4, XA1	
Ilość cementu [kg/m ³ betonu]	345	345	360	360	390	390	420	420
Emisja [kg CO ₂ / t cementu]	889	482	889	482	889	704	889	704
Emisja na 1 m ³ betonu [kg CO ₂ / m ³ betonu]	310	166	324	174	351	275	378	296
Różnica emisji przy zastosowaniu cementu nisko-klinkierowego [kg CO ₂ / m ³ betonu]	141		150		73		78	

Zgodnie z danymi przedstawionymi w tabeli 3, zmiana rodzaju zastosowanego cementu z cementu portlandzkiego CEM I na cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II, pozwala osiągnąć ok. redukcję emisji CO₂ na poziomie ok. 75 kg/m³ betonu, natomiast zastosowanie cementu hutniczego CEM III (głównie CEM III/A) pozwala zredukować poziom emisji CO₂ o ok. 145 kg/m³ betonu.

Kolejnym kierunkiem działania, w celu obniżenia poziomu emisji CO₂ do atmosfery przy produkcji betonu, jest optymalizacja ilości cementu w składzie betonu. Uzyskuje się to dzięki stosowaniu dodatków typu II, przy równoczesnym zastosowaniu plastyfikatorów i superplastyfikatorów o wysokiej efektywności pozwalających zredukować stosunek wodno-cementowy i uzyskać właściwą urabialność (konsystencję). Zasady stosowania dodatków typu II w składzie betonu opisano w punkcie 3.2.2.

3.2. Normowe i specyfikacyjne uwarunkowania stosowania cementów oraz betonów niskoemisyjnych w budownictwie

Beton jest materiałem budowlanym dającym szerokie możliwości kształtowania właściwości mieszanki betonowej, jak i betonu stwardniałego. W Polsce produkcja betonu powinna być zgodna z normą PN-EN 206 [95] wraz z krajowym uzupełnieniem PN-B 06265 [103]. Podstawowym założeniem powyższych norm, poza osiągnięciem odpowiedniej klasy wytrzymałości na ściskanie, jest uzyskanie betonu trwałego w danym środowisku korozyjnym w tzw. klasie ekspozycji. Ponieważ produkcja betonu wiąże się z eksploatacją nieodnawialnych surowców naturalnych oraz emisją dwutlenku węgla CO₂ (głównie z użytego cementu), uzyskanie trwałego betonu (konstrukcji) należy postrzegać jako podstawowe wymaganie ekologiczne. Odpowiednia trwałość konstrukcji betonowych i żelbetowych jest podstawą do racjonalnego wykorzystywania nieodnawialnych surowców naturalnych. Poza zgodnością z wyżej wymienionymi normami, beton powinien również spełniać wymagania określone w branżowych specyfikacjach technicznych, czy warunkach wykonania i odbioru robót budowlanych. Należy zaznaczyć, że obecne wymagania zawarte w dokumentach odniesienia nie narzucają ograniczeń mających na celu redukcję emisji CO₂ związanej z produkcją betonu (cementu). Natomiast w wielu przypadkach ograniczają możliwości stosowania cementów niskoemisyjnych o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego.

3.2.1. Oddziaływanie środowiska – klasy ekspozycji wg PN-EN 206

Zgodnie z normą PN-EN 206 [95] szczególnie istotną właściwością współczesnego betonu jest jego trwałość. Uzyskanie trwałego betonu jest uwarunkowane dostosowaniem jego składu do oddziaływujących czynników środowiskowych powodujących degradację (korozję) betonu. Czynniki technologicznymi warunkującymi trwałość betonu są: właściwy dobór jakościowy i ilościowy składników mieszanki betonowej, właściwy transport mieszanki na plac budowy, odpowiednie ułożenie, zagęszczenie mieszanki betonowej w szalunkach oraz właściwa pielęgnacja cieplno-wilgotnościowa dojrzewającego betonu [91]. W przypadku konstrukcji żelbetowych istotnym czynnikiem jest również odpowiednia grubość otuliny zbrojenia [88,104]. W normie PN-EN 206 [95] sklasyfikowano możliwe oddziaływania środowiska w tzw. klasach ekspozycji. Dla każdej klasy ekspozycji podano opis oddziaływania środowiska oraz wytyczne, które powinny być spełnione w celu uzyskania trwałego betonu. Wytyczne dotyczą minimalnej ilości cementu, maksymalnego stosunku wodno-cementowego, minimalnej klasy wytrzymałości na ściskanie betonu, a także w przypadku korozji mrozowej, minimalnej zawartości powietrza w strukturze stwardniałego betonu oraz stosowania kruszywa o odpowiedniej mrozoodporności.

W klasach ekspozycji XA2 i XA3, w przypadku korozji siarczanowej, stosuje się cement odporny na siarczany SR (HSR).

Z uwagi na różne uwarunkowania klimatyczne, stan krajowych doświadczeń inżynierskich, dostępną bazę surowcową, różne standardy produkcji w poszczególnych krajach Unii Europejskiej, norma PN-EN 206 [95] dopuszcza dostosowanie wymagań przez poszczególne kraje do panujących na ich obszarze warunków atmosferycznych i ugruntowanych doświadczeń. Polskie uzupełnienie krajowe do normy PN-EN 206 [95] zawarte zostało w normie PN-B 06265:2018-10 [103]. Pełną charakterystykę klas ekspozycji oraz zalecane wartości graniczne, dotyczące składu i właściwości betonu wg PN-B 06265:2018-10 [103], przedstawiono w tabeli 4. Zaznaczyć należy, że zgodnie z zapisami normy PN-EN 206 [95] wymagania dotyczące minimalnej zawartości cementu oraz maksymalnego stosunku wodno-cementowego stosuje się we wszystkich przypadkach, natomiast wymaganie minimalnej klasy wytrzymałości na ściskanie betonu może być wymaganiem określonym dodatkowo. Natomiast w praktyce inżynierskiej wymaganie minimalnej klasy wytrzymałości na ściskanie betonu często traktuje się obligatoryjnie, kiedy w przypadku klasy ekspozycji XC (karbonaryzacja) ilość cementu (klinkieru portlandzkiego) jest wymaganiem najistotniejszym.

Tabela 4. Klasy ekspozycji oraz zalecane wartości graniczne dotyczące składu i właściwości betonu według PN-B-06265:2018-10 [103]

Klasa ekspozycji		Środowisko	Maks. Wskaźnik w/c ^{a)}	Min. Zawartość cementu [kg/m ³] ^{a)}	Min. Zawartość CEM I lub CEM II/A przy stosowaniu dodatku mineralnego [kg/m ³]	Minimalna klasa wytrzymałości betonu	Minimalna zawartość powietrza [%]	Inne wymagania
Brak zagrożenia agresją środowiska lub brak zagrożenia korozją		X0	-	-	-	C8/10	-	-
Korozja wywołana karbonatyzacją		XC1	0,70	260	250	C16/20	-	-
		XC2	0,65	280	260	C16/20	-	-
		XC3	0,60	280	260	C20/25	-	-
		XC4	0,55	300	280	C25/30	-	-
Korozja wywołana chlorkami	nie pochodzącymi z wody morskiej	XD1	0,55	300	280	C30/37	-	-
		XD2	0,50	320	300	C30/37	-	-
		XD3	0,45	320	300	C35/45	-	-
	pochodzącymi z wody morskiej	XS1	0,50	300	280	C30/37	-	-
		XS2	0,45	320	300	C35/45	-	-
		XS3	0,45	340	310	C35/45	-	-
		XF1	0,55	300	280	C30/37	-	F ₂ ^{f)}
Agresja spowodowana zamrażaniem/rozmarzaniem	XF2	0,55	300	b	C25/30	c)	F ₁ ^{f)}	
	XF3	0,50	320	b	C30/37	c)	F ₁ ^{f)}	
	XF4	0,45	340	b	C30/37	c,d)	F _{NaCl} ⁱ⁾	
	XA1	0,55	300	280	C30/37	-	-	
Środowiska agresywne chemicznie	XA2	0,50	320	300	C30/37	-	Cement odporny na siarczany ^{e)}	
	XA3	0,45	360	330	C35/45	-		
	XM1	0,55	300	280	C30/37	-		MDE wartość deklarowana ^{g,h)}
Agresja wywołana ścieraniem	XM2	0,50	300	280	C30/37	-	dla 2/8 MDE ≤ 25 dla 8/16 MDE ≤ 20 ^{g,h)}	
	XM3	0,45	320	300	C35/45	-	dla 2/8 MDE ≤ 20 dla 8/16 MDE ≤ 15 ^{g,h)}	

^{a)} W przypadku stosowania koncepcji współczynnika *k* maksymalny współczynnik w/c oraz minimalną zawartość cementu modyfikuje się zgodnie z PN-EN 206+A1:2016-12 p.5.2.5.2.

^{b)} Dopuszcza się stosowanie dodatków typu II do produkcji betonu, lecz nie jako ekwiwalent dla minimalnej ilości cementu.

^{c)} Zawartość objętościowa powietrza w mieszance betonowej przed jej wbudowaniem zależy od maksymalnego wymiaru ziaren zastosowanego kruszywa i powinna wynosić dla kruszywa: do 8 mm ≥ 5,5 %; do 16 mm ≥ 4,5 %; do 32 mm ≥ 4,0 %; do 64 mm ≥ 3,5 %.

^{d)} Beton o konsystencji V0 (≥ 31 s) oznaczonej wg PN-EN 12350-3 i w/c ≤ 0,4 może być produkowany bez dodatkowego napowietrzenia.

^{e)} W przypadku, gdy zawartość siarczanów (SO₄²⁻) w środowisku pracy betonu wskazuje na klasy ekspozycji XA2 lub XA3 należy zastosować cement odporny na siarczany (SR) wg PN-EN 197-1 lub cement odporny na siarczany (HSR) wg PN-B-19707.

^{f)} Kruszywo o mrozodporności odpowiadającej kategorii (F) wg PN-EN 12620.

^{g)} Kruszywo o współczynniku ścieralności micro-Deval'a odpowiadającej kategorii (M_{DE}) wg PN-EN 12620.

^{h)} Wymagana właściwa pielęgnacja i obróbka powierzchni.

ⁱ⁾ Kruszywo o mrozodporności w roztworze NaCl (F_{NaCl}) odpowiadającej wartości deklarowanej, określonej na podstawie badania wg PN-EN 1367-6.

Należy zwrócić uwagę, iż wymagania dla betonu w klasach ekspozycji XC, XS oraz XD są związane z korozją zbrojenia, a więc powinny być odmienne dla elementów niezbrojonych oraz elementów w których zastosowano zbrojenie kompozytowe. Zapisy normy nie limitują maksymalnej zawartości cementu w danej klasie ekspozycji. Zgodnie z zapisami normy PN-EN 206 [95] możliwe jest odejście od zawartych w tabeli 4 wartości granicznych składu i właściwości betonu jeżeli wykaże się, że trwałość betonu w danym środowisku korozyjnym jest odpowiednia w stosunku do cementu referencyjnego (najczęściej cementu portlandzkiego CEM I). Pomimo możliwości optymalizacji składu betonu, jakie daje projektowanie trwałościowe, nie jest ono jednak często stosowane w praktyce inżynierskiej. Powodem tego jest konieczność wykonywania długotrwałych badań trwałościowych oraz niechęć, ze strony projektantów oraz kadry zarządzającej procesem budowlanym, do akceptacji takich rozwiązań. Pokonanie tej bariery jest istotne w szerszym stosowaniu cementów (betonów) niskoemisyjnych w budownictwie.

W normie krajowej PN-B 06265:2018-10 [103] zawarto także wytyczne określające możliwości stosowania danego rodzaju cementu w klasie ekspozycji związane w oddziaływaniem środowiska. Prawie we wszystkich klasach ekspozycji znajdują zastosowanie cementy portlandzkie CEM I, cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A,B-S; CEM II/A,B-V; CEM II/A-V,LL; CEM II/A-M (S-LL; S-V; V-LL); CEM II/B-M (S-V), a także przy spełnieniu dodatkowych wymagań, cement hutniczy CEM III/A głównie o niskim cieple hydratacji LH. Stan taki wynika z dotychczasowej praktyki. Bardzo ograniczone jest stosowanie cementów zawierających w swoim składzie wapień CEM II/B-LL oraz CEM II/B-M (S-LL; V-LL), oraz cementów pucolanowych CEM IV/B i cementów wieloskładnikowych CEM V/B.

Cementy te mogą być zastosowane jedynie w klasach ekspozycji X0, XC1 oraz XC2. Podobna tendencja w ograniczaniu stosowania niskoemisyjnych cementów wieloskładnikowych ma miejsce również w innych krajach europejskich (tabela 5). Ograniczenia w stosowaniu cementów zawierających w swoim składzie wapień (LL,L) wynikają również ze zbyt małego doświadczenia z ich stosowania w warunkach krajowych, w tym również braku kompleksowych badań.

Tabela 5. Możliwości stosowania poszczególnych rodzajów cementów powszechnego użytku w klasach ekspozycji XC oraz XF w wybranych krajach europejskich [70]

Kraj	Klasa ekspozycji	min f_c	max (w/c) _{eq}	min c kg/m ³	CEM I	CEM II															CEM III			CEM IV		CEM V		
						S		D	P/Q		V		W		T	LL		L		M		A	B	C	A	B	A	B
						A	B	A	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B		
Austria	XC1+XF1	-	0,55	300	x	x	x	x			x	x	(x) ₂				x	(x) ₂	(x) ₂	x	(x) ₂							
Belgia	EE3 (XC4+XF1)	C30/37	0,50	320	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
Czechy	XC1 do XC4 lub XF1	C30/37	0,50 lub 0,55	300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
Dania	(XC2, XC3, XC4, XF1, XA1)	C25/30	0,55	150 ³⁾	(x) ⁴⁾								(x) ₄	(x) ₄			(x) ₄		(x) ₄									
Finlandia	XC3 lub XC4, XF1	C25/30	0,60	250 ⁵⁾	x	x	(x) ₆	x			x	(x) ₆			(x) ₆			x	(x) ₆									
Niemcy	XC4 + XF1	C25/30	0,60	280	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o	x	x	o	o	o	(x) ₇	(x) ₇	x	x	o	o	(x) ₉	(x) ₉	(x) ₉
Irlandia	XC2 lub XC4 + XF1	C30/37 gdy XC4 + XF1	0,55	320	x																							
Włochy	XC1	C25/30	0,60	300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	XC2 + XF1	C32/40	0,50	320	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Luksemburg	XC4 + XF1	C25/30	0,60	280	x	x	x	x							x	x			(x) ₁₀		x	x						
Holandia	XC3	-	0,55	280	x	x	x				x	x			x	x						x	x					
	XC4 + XF1	-	0,50	300	x	x	x				x	x										x	x					
Norwegia	XC4 + XF1	-	0,60	250	x	x		x							x		x											
Portugalia	XC4 + XF1 ¹¹⁾	C30/37	0,60	280	x	x		x	x		x		x		x		x											
			0,55	300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	(x) ₁₂				(x) ₁₂	(x) ₁₂	(x) ₁₂		
Szwecja	XC4, XF1	-	0,55	300	(x) ⁴⁾	(x) ⁴⁾	(x) ₄				(x) ₄				(x) ₄			(x) ₄	(x) ₃	(x) ₃								
Szwajcaria	XC4 + XF1	-	0,50	300	x	x		x							x				(x) ₄ ¹³⁾									
Wielka Brytania	XC3/4 + XF1	C28/35	0,60	280	x	x	x	x							x	x	x				x	x						

x dopuszczony
(x) dopuszczony z ograniczeniami
nie wymieniony
o niedopuszczony

Objaśnienia:

- z powodu złożoności arkuszy krajowych przedstawione porównanie nie jest wyczerpujące
- należy przeprowadzić badanie cementu
- min zawartość wypełniacza 375 kg/m³
- min klasa wytrzymałości 42,5
- min c = 270 kg/m³ w przypadku XC4
- cement niedopuszczony w przypadku XC4
- tylko CEM II/A-M (S-D; S-T; S-L; D-T; D-L; T-L; S-P; S-V; D-P; D-V; P-V; P-T; P-L; V-T; V-L) oraz CEM II/B-M (S-D; S-T; D-T; S-P; D-P; P-T; S-V; D-V; P-V; V-T)
- tylko CEM IV/B (P) i dotyczy jedynie trasy zgodnego z DIN 51043, stosowanego jako składnik główny do max. 40% masowo
- tylko CEM V/A (S-P) i CEM V/B (S-P) i dotyczy jedynie trasy zgodnego z DIN 51043
- tylko CEM III/A-M (S-D; S-T; S-L; S-V)
- założenie
- nie mniej niż 50% masy klinkieru
- tylko CEM III/A-M (D-L)

Norma PN-B 06265:2018-10 [103] wprowadza również pojęcie „czasu równoważnego”. W normie wyraźnie określono, iż termin badania właściwości betonu, innych niż wytrzymałość na ściskanie, jest uzależniony od rodzaju oraz od wytrzymałości wczesnej na ściskanie użytego cementu (tabela 6) [103]. Zdaniem autora, wytrzymałość na ściskanie betonu jest istotnym elementem kształtowania trwałości i także powinna być oceniana w okresie równoważnym. Rozwiązanie takie pozwoliłoby także na optymalizację zawartości cementu w składzie betonu.

Tabela 6. Czas wykonywania badań w zależności od rodzaju zastosowanego cementu [103]

Rodzaj cementu	Czas równoważny [dni]
CEM I (R), CEM II/A (R)	28
CEM I (N), CEM II/A (N) CEM II/B (N,R) CEM VI/A	56
CEM II/C ¹⁾ CEM III CEM IV/B CEM V CEM VI ¹⁾	90

¹⁾ przewidywane w nowelizacji prPN-B 06265:2022 [105]

Szczególnie pozytywnym aspektem wprowadzenia pojęcia czasu równoważnego jest wydłużenie czasu dojrzewania betonu z użyciem cementów niskoemisyjnych. Cechą charakterystyczną tych cementów (CEM II÷CEMVI) jest niższy stopień hydratacji w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I. Wydłużenie okresu dojrzewania pozwala na pełne wyeksponowanie zalet tych cementów, m.in. doszczelnienie struktury betonu przez produkty hydratacji i poprawę uzyskiwanych wyników badań trwałościowych (wytrzymałościowych), bez konieczności zwiększania zawartości cementu w składzie betonu [12,14,40].

W konstrukcjach żelbetowych, zastosowany rodzaj cementu oraz klasa ekspozycji, ma także wpływ na wymaganą nominalną otulinę zbrojenia pasywnego lub sprężonego. Wytyczne dotyczące minimalnej otuliny zbrojenia zawarto w normie PN-EN 1992-1-1:2008 [106]. Otulinę zbrojenia dobiera się w zależności od założonego okresu użytkowania konstrukcji, klasy ekspozycji, rodzaju cementu, a także klasy wytrzymałości na ściskanie betonu, stosunku w/c oraz minimalnej zawartości cementu w betonie. W tabeli 7 przedstawiono wymagania dotyczące nominalnej otuliny zbrojenia dla klas ekspozycji XC4 przy założeniu 100-letniego okresu użytkowania [2].

Tabela 7. Jakość betonu i otulina zbrojenia dla założonego okresu użytkowania 100 lat [2]

Klasa	Warunki eksploatacji	Typ cementu	Klasa wytrzymałości, maksymalny stosunek w/c,							
			minimalna zawartość cementu [kg/m ³]							
			Nominalna otulina zbrojenia zwykłego lub sprężonego [mm]							
			15+Δc	20+Δc	25+Δc	30+Δc	35+Δc	40+Δc	45+Δc	50+Δc
1. Brak zagrożenia korozją										
X0	Całkowicie suche	Każdy	Nie zaleca się zakładania tej klasy ekspozycji w konstrukcjach żelbetonowych							
2. Korozja spowodowana karbonatyzacją										
XC1	Suche lub stale mokre	Każdy	C20/25 0.70 240	<<<<<<	<<<<<<	<<<<<<	<<<<<<	<<<<<<	<<<<<<	<<<<<<
XC2	Mokre, rzadko suche	Każdy	-	-	C25/30 0.65 260	<<<<<<	<<<<<<	<<<<<<	<<<<<<	<<<<<<
XC3	Umiarkowanie wilgotne	Każdy za wyjątkiem IV B	-	C40/50 0.45 340	C35/45 0.50 320	C35/45 0.55 300	C30/37 0.60 280	<<<<<<	<<<<<<	<<<<<<
XC4	Cyklicznie mokre i suche									

Δc dodatek grubości otuliny z uwagi na odchyłki wykonawcze
 - oznacza niezalecaną otulinę (czyli zaleca większą grubość otuliny)
 <<<<<< parametry jakościowe betonu podane poprzedniej kolumnie nie powinny być obniżane

3.2.2. Zasady uwzględniania dodatków typu II w składzie betonu wg PN-EN 206

Zgodnie z definicją zawartą w normie PN-EN 206 [95] dodatek do betonu to *drobnoziarnisty nieorganiczny składnik stosowany do betonu w celu poprawy niektórych właściwości lub uzyskania właściwości specjalnych*. Dodatek może w znaczny sposób modyfikować właściwości, zarówno mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu. Zawartość dodatku zazwyczaj przekracza 5% masy cementu [19,23,21]. Norma wyróżnia dwa typy dodatków: typu I (dodatki prawie obojętne) oraz typu II (dodatki o właściwościach pucolanowych lub utajonych właściwościach hydraulicznych). Stosując dodatki typu II można zoptymalizować ilość cementu w składzie betonu. Wówczas w celu spełnienia wymogów zawartych w normie PN-EN 206 [95], dotyczących minimalnej zawartości cementu oraz maksymalnego stosunku wodno-cementowego dla danej klasy ekspozycji, ilość cementu zastępuje się sumą ilości zastosowanego cementu oraz całości lub części zastosowanego dodatku typu II.

Norma PN-EN 206 [95] dopuszcza trzy koncepcje uwzględniania dodatków typu II w składzie betonu:

- równoważnych właściwości użytkowych (ECPC);
- kombinacji równoważnych właściwości użytkowych (ECCC);
- współczynnika k.

Koncepcja równoważnych właściwości użytkowych, jak i koncepcja kombinacji równoważnych właściwości użytkowych, pozwalają na stosowanie dodatków w dowolnych ilościach oraz uwzględnianie ich w składzie betonu w całości, jeżeli wykaże się ich przydatność, a uzyskany beton będzie odpowiednio wytrzymały i trwały. Zapisy takie ułatwiają projektowanie betonu z dodatkami typu II, nakładając jednocześnie obowiązek udokumentowania równoważnych właściwości betonu o zmodyfikowanym składzie. W badaniach jako cement referencyjny (odniesienia) zastosować można dowolny cement zgodny z PN-EN 197-1, dopuszczony do stosowania w danej klasie ekspozycji wg PN-EN 206 [95] oraz PN-B 06265 [103]. Najczęściej cementem referencyjnym jest cement portlandzki CEM I [107].

Trzecia koncepcja, uwzględnienia dodatków typu II w składzie betonu, to koncepcja współczynnika „k” – metoda zalecana i w kraju powszechnie stosowana. W normie PN-EN 206 [95] określono zasady stosowania koncepcji współczynnika k w odniesieniu do popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego oraz zmielnego granulowanego żużla wielkopieczowego stosowanych razem z cementem portlandzkim CEM I lub cementem portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/A. Wielkość „k” określa jaką część zastosowanego dodatku typu II można uznać za ekwiwalent cementu odnosząc się do wymagań klas ekspozycji związanych z minimalną zawartością cementu i maksymalnym współczynnikiem wodno-cementowym. W praktyce stosowanie koncepcji współczynnika „k” sprowadza się do zastąpienia współczynnika wodno-cementowego współczynnikiem:

- $w/c = \text{woda}/(\text{cement} + k \times \text{dodatek})$,
oraz spełnieniu warunku
- ilość $(\text{cement} + k \times \text{dodatek}) \geq \text{min. zawartość cementu wymagana z uwagi na wyspecyfikowaną klasę ekspozycji}$.

Wielkość współczynnika „k” jest różna w zależności od aktywności zastosowanego dodatku typu II (tabela 8).

Tabela 8. Zasady stosowania koncepcji współczynnika „k” wg PN-EN 206 [95]

Rodzaj dodatku typu II	Współczynnik k	Maksymalna zawartość dodatku ¹⁾ [masowo]	Uwagi
Popiół lotny (zgodny z PN-EN 450-1 [108])	0,4	popiół/cement $\leq 0,33$	dotyczy CEM I
		popiół/cement $\leq 0,25$	dotyczy CEM II/A
Pył krzemionkowy klasy 1 (zgodny z PN-EN 13263-1 [109])	2,0	pył/cement $\leq 0,11$	dotyczy CEM I i CEM II/A ²⁾ , ilość cementu nie powinna być zmniejszona o więcej niż 30 kg/m ³ w stosunku do minimalnej ilości cementu w danej klasie ekspozycji
	1,0 Dla $w/c > 0,45$ w klasach ekspozycji XA, XF		
Zmielony granulowany żużel wielkopieczowy (zgodny z PN-EN [110])	0,6 (wielkość zalecana)	żużel/cement $\leq 1,0$	dotyczy cementów CEM I i CEM II/A

¹⁾ w przypadku stosowania większych ilości dodatków typu II, nadmiaru nie należy wględniać przy obliczaniu minimalnej zawartości cementu oraz stosunku w/c

²⁾ z wyłączeniem cementu CEM II/A-D

Zawarte w normie PN-EN 206 [95] koncepcje stosowania dodatków typu II w składzie betonu, w wielu przypadkach odwołują się do przepisów lokalnych, obowiązujących w miejscu stosowania [23,111]. Polskie uzupełnienie krajowe PN-B 06265 [103] wprowadza następujące dodatkowe wymagania:

- do produkcji betonu towarowego zgodnego z PN-EN 206 [95] należy stosować popiół lotny krzemionkowy kategorii A (strata prażenia $\leq 5\%$ masy) wg PN-EN 450-1 [108];
- koncepcji współczynnika k nie należy stosować w odniesieniu do popiołu lotnego wg PN-EN 450-1 [108] w celu obniżenia minimalnej zawartości cementu w klasach ekspozycji XF2, XF3, XF4.

Stosowanie dodatków typu II w składzie betonu pozwala na częściowe zastąpienie cementu ograniczając jego zużycie, a zatem w znaczym stopniu przyczynia się do ograniczenia poziomu emisji CO₂ na 1m³ betonu, a także do ograniczenia zużycia kruszywa w betonie. Normy PN-EN 206 [95] wraz z PN-B 06265 [103] ograniczają stosowanie koncepcji współczynnika k jedynie do cementów portlandzkich CEM I oraz cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A. Należy zwrócić uwagę, że normalizacyjne rozszerzenie możliwości uwzględniania dodatków typu II, zwłaszcza popiołu lotnego, w składzie betonu dla cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/B oraz cementów hutniczych CEM III/A, pozwoliłoby w większym stopniu wykorzystać aktywność dodatków typu II oraz ich wpływ w kształtowaniu właściwości reologicznych mieszanki betonowej. Takie rozwiązania funkcjonują w Europie (tabela 9).

Tabela 9. Przykłady zasad koncepcji współczynnika k w odniesieniu do popiołu lotnego stosowanego z cementem hutniczym CEM III/A i B w wybranych krajach Europy [62]

Kraj	Rodzaj cementu	Maksymalna uwzględniana ilość dodatku (a/c)	Wartość współczynnika k
Belgia	CEM III/A	0,25	0,2
Holandia	CEM III/A	0,33	0,2
	CEM III/B	0,33	0,2
Niemcy	CEM III/A	0,33	0,4
	CEM III/B ¹⁾	0,33	0,4

¹⁾ Udział granulowanego żużla wielkopiecowego do 70 % masy

Szersze stosowanie cementów wieloskładnikowych pozwala na spełnienie wymagań dotyczących minimalnej zawartości cementu w danych klasach ekspozycji przy mniejszym udziale klinkieru portlandzkiego, co daje możliwość redukcji śladu węglowego betonu. Zastosowanie nieklinkierowych składników głównych w składzie cementu pozwala również na ich szersze wykorzystanie w betonie bez konieczności dosyponowania dodatkowym silosem na wytwórni betonu lub placu bodowy, co jest konieczne przy stosowaniu dodatków typu II do betonu.

3.2.3. Stosowanie betonów z użyciem cementów wieloskładnikowych w budownictwie

Uwagę skupiono na aplikacjach cementów wieloskładnikowych w obszarach budownictwa, w których, w praktyce inżynierskiej, stosuje się głównie cement portlandzki CEM I tj. inżynieria komunikacyjna, prefabrykacja, betony wysokich wytrzymałości BWW oraz beton samozagęszczalny SCC. Podano również przykłady zastosowań cementów wieloskładnikowych w konstrukcjach masywnych.

Inżynieria komunikacyjna

Obiekty infrastrukturalne, takie jak drogi, mosty i wiadukty, są obiektami szczególnie narażonymi na korozyjne oddziaływanie środowiska. Wymaga się, aby obiekty te były tak zaprojektowane i wykonane, aby w przyjętym okresie użytkowania i poziomie utrzymania była zapewniona ich trwałość. W zależności od usytuowania i rodzaju obiektu okres użytkowania przyjmuje się jako 100, 150, a nawet 200 lat [20,39,66]. Warunki techniczne, jakim pominy odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, określono w Rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 30 maja 2000 roku [66], które zostało zaktualizowane w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 1 sierpnia 2019 roku [65]. Wprowadzono szereg zmian mających na celu dostosowanie wymagań do obecnego stanu wiedzy z zakresu technologii betonu i możliwości stosowania rozwiązań optymalnych technologicznie. Określono w nich wymagania, w zależności od klasy ekspozycji środowiskowej, dotyczące stopnia mrozoodporności zwykłej wg [103] oraz maksymalnej głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wg [92]. Wymagania przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Dodatkowe wymagania zawarte w [65]

Klasa ekspozycji	Minimalny stopień mrozoodporności	Maksymalna głębokość penetracji wody pod ciśnieniem [mm]
XF1	F100	-
XF2, XF3	F150	-
XF4	F200	-
XA1	-	60
XA2	-	50
XA3, XD3 lub XS3	-	40

Dopuszczono stosowanie cementów innych niż cementy portlandzkie CEM I, z wyłączeniem zastosowań w elementach sprężanych. W konstrukcjach masywnych uwzględniono możliwość stosowania cementów o niskim ciepłe hydratacji LH. Wprowadzone zmiany pozwalają na stosowanie rozwiązań technologicznie optymalnych, zwiększających trwałość konstrukcji i ograniczających stosowanie tylko cementów portlandzkich CEM I.

Wytyczne ogólne zawarte w rozporządzeniu dotyczące betonów stosowanych do wykonania obiektów drogowych doprecyzowano w Warunkach Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych M-13.01.00v3 GDDKiA z 30 września 2019 roku [18]. W dokumencie wymieniono możliwe do stosowania cementy powszechnego użytku oraz określono dodatkowe wymagania związane z maksymalną zawartością alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. Zgodnie z M-13.01.00v3 [18] do wykonania obiektów drogowych dopuszcza się cementy: CEM I, CEM II/A,B-S, CEM II/A-V, CEM II/A-LL (klasy wytrzymałościowej 42,5 i wyższej) o zawartości alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,80\%$, CEM II/A-V ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 1,20\%$) lub cementy z niską zawartością aktywnych alkaliów NA, a także cement hutniczy CEM III/A-NA (dodatkowe wymagania przy klasie ekspozycji XF4). Zatem wyklucza się możliwości zastosowania w drogowych obiektach inżynierski m. in.: cementów

portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A,B-M, cementu hutniczego CEM III/B, a także cementów pucolanowych CEM IV/A,B i cementów wieloskładnikowych CEM V/A,B.

Posadowienie drogowych obiektów inżynierskich bardzo często wymaga wykonania fundamentów pośrednich w postaci pali. Z uwagi na trudności prowadzenia procesu zagęszczania mieszanki betonowej podczas wykonywania pali monolitycznych wymaga się, aby mieszanka charakteryzowała się specjalnymi właściwościami, a w szczególności zdolnością do zagęszczania pod własnym ciężarem, stabilnością i odpowiednią urabialnością [17]. Specjalne właściwości mieszanki uzyskuje się m. in. poprzez zastosowanie odpowiednio wysokiej zawartości frakcji drobnych, w tym wysokiej zawartości cementu. Podstawowe wymagania dotyczące betonu palowego określono w normie PN-EN 206 [95] (tabela 11).

Tabela 11. Minimalna zawartość cementu i frakcji drobnych w betonie do pali wierconych i przemieszczeniowych formowanych w gruncie [95]

Zawartość cementu:		
betonowanie w suchych warunkach		$\geq 325 \text{ kg/m}^3$
betonowanie przy zanurzeniu (pod wodą lub w cieczy stabilizującej)		$\geq 375 \text{ kg/m}^3$
Zawartość frakcji drobnych ^a		
kruszywo grube	$D_{\text{lower}} > 8 \text{ mm}$	$\geq 400 \text{ kg/m}^3$
	$D_{\text{upper}} > 8 \text{ mm}$	
kruszywo grube	$D_{\text{lower}} \geq 4 \text{ mm}$	$\geq 450 \text{ kg/m}^3$
	$D_{\text{upper}} \leq 8 \text{ mm}$	
^a Frakcje drobne: Ziarna o wymiarach $\leq 0,125 \text{ mm}$ (w tym dodatki i cement).		

Zgodnie z wytycznymi GDDKiA, cement użyty do wykonania pali powinien spełniać wymagania zawarte w M-13.01.00v3 [18]. Zatem wyklucza się możliwość stosowania m. in.: cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A,B-M, cementu hutniczego CEM III/B, a także cementów pucolanowych CEM IV oraz cementów wieloskładnikowych CEM V.

W ostatnich latach dokumenty GDDKiA ulegają dynamicznym zmianom, choćby związanym z ograniczeniem negatywnych skutków wywołanych korozją alkaliczną kruszyw [33]. Stosowanie cementów NA, czyli o niskiej zawartości aktywnych alkaliów, jest jedną ze skuteczniejszych metod ochrony betonu przed negatywnymi skutkami reakcji alkali-kruszywo. Widoczne to jest w zapisach normy PN-B-19707 [112] na cementy specjalne niskoalkaliczne NA. Należy zwrócić uwagę na występowanie licznych ograniczeń wynikających z dokumentów GDDKiA, które nie pozwalają na ograniczenie śladu węglowego stosowanych betonów, szczególnie w przypadku betonu przeznaczonego do wykonania fundamentów bezpośrednich oraz pośrednich w postaci pali, a także w elementach betonowych sprężanych.

Przykładem zastosowania cementów wieloskładnikowych w budownictwie infrastrukturalnym może być budowa Mostu „Milenium” we Wrocławiu. Pylon mostu narażony na oddziaływanie środowiska wg klas ekspozycji XF2, XC4 oraz XD1 wykonano z zastosowaniem cementu portlandzkiego żuźlowego CEM II/B-S 42,5 N. Do konstrukcji płyty pomostu narażonej na oddziaływania korozyjne wg klas ekspozycji XF4, XC4 oraz XD3 użyto cementu

portlandzkiego CEM I 42,5 R. Fundamenty, narażone na oddziaływanie środowiska zgodnie z klasami ekspozycji XA2, XC2 oraz XF1, wykonano z cementu hutniczego CEM III/A 32,5N HSR/LH/NA. Odpowiedni dobór rodzaju zastosowanego cementu do wykonania poszczególnych elementów mostu pozwolił na wykonanie trwałej konstrukcji przy jednoczesnej redukcji śladu węglowego [25]. Widok mostu „Milenium” przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Widok mostu „Milenium” we Wrocławiu [7]

Kolejnym przykładem rozsądnego, inżynierskiego podejścia do projektowania oraz wykonania obiektów infrastrukturalnych z równoczesnym uwzględnieniem, trwałości konstrukcji oraz minimalizacji śladu węglowego, jest budowa pylonu Mostu Rędziańskiego we Wrocławiu. Do budowy pylonu wykorzystano trzy rodzaje betonu. W części górnej pylonu (agresja środowiska wg klas ekspozycji XC4, XD1 oraz XF2) zastosowano beton klasy wytrzymałości na ściskanie C50/60 z wykorzystaniem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R, do filarów pylonu (agresja środowiska wg klas ekspozycji XC2, XD1 oraz XF2) również zastosowano beton klasy C50/60, ale użyto cementu hutniczego CEM III/A 42,5N HSR/NA. Zmiana rodzaju cementu pozwoliła na zwiększenie grubości poszczególnych odcinków roboczych do 2,5 m, co znacznie przyspieszyło prace. Zastosowanie cementu portlandzkiego CEM I do wykonania filarów pylonu ograniczałoby grubość betonowanych warstw do 0,5m. Objętość konstrukcji masywnej fundamentu (agresja środowiska wg klas ekspozycji XA2, XC2, XF1, XD1) wynosiła ponad 8000 m³. Do wykonania fundamentu zastosowano beton klasy C30/37 z użyciem cementu hutniczego CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA, w celu ograniczenia gradientu temperatury, pomiędzy środkiem elementu masywnego a zewnątrzni powierzchniami betonu (minimalizacji ryzyka powstania spękań termicznych betonu). Gradient temperatury w masywie bloku fundamentowego nie przekroczył 20°C, a temperatura wnętrza masywu nie przekraczała 65°C. Pozwoliło to uzyskać monolityczny

blok fundamentowy pozbawiony spękań. Wszystkie betony wykonano z zastosowaniem plastyfikatorów, superplastyfikatorów, domieszki napowietrzającej oraz dodatku mikrokrzemionki (poprawa szczelności). Wyniki badań betonu stwardniałego potwierdziły zakładany poziom wytrzymałości na ściskanie dla poszczególnych klas wytrzymałościowych oraz uzyskany stopień mrozoodporność F150 i wysoką szczelność betonu (nasiąkliwość wagowa <5%, głębokość penetracji wody pod ciśnieniem, przy badaniu stopnia wodoszczelności W8, wynosiła < 30mm) [7,20]. Widok pylonu Mostu Rędzińskiego pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Widok pylonu Mostu Rędzińskiego we Wrocławiu [20]

Cementy wieloskładnikowe mogą być również z powodzeniem stosowane w nawierzchniach drogowych. Przykładem może być zastosowanie cementu hutniczego CEM III/A 42,5N przy realizacji nawierzchni autostrady A44 w Niemczech oraz obwodnicy Antwerpii w Belgii [22]. W Polsce cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 42,5N-NA zastosowano m. in. przy realizacji nawierzchni drogi powiatowej Otmice-Izbicko. Realizacja obejmowała przebudowę konstrukcji drogi powiatowej o długości 1,5 km wraz z jej poszerzeniem do 6 m i wzmocnieniem do kategorii obciążenia ruchem KR3. Zastosowano beton klasy wytrzymałościowej C30/37 do klas ekspozycji XC4, XD2, XF4, XM1, XA1. Użycie cementu portlandzkiego żuźlowego CEM II/B-S 42,5 N uwarunkowane było prowadzeniem pracy w temperaturach otoczenia $25 \div 30^{\circ}\text{C}$ w okresie od czerwca do sierpnia. W celu ograniczenia odparowania wody z powierzchni betonu, eliminacji spękań na skutek skurczu plastycznego, prace prowadzono w godzinach w których nie występowało silne nasłonecznienie. Zakładany czas bezusterkowej eksploatacji wykonanej nawierzchni to 30 lat. Uzyskane wyniki badań betonu przedstawiono w tabeli 12.

Tabela 12. Właściwości mieszanki betonowej oraz betonu stwardniałego – droga Otmice-Izbicko [49]

Właściwość	Jednostka	Wynik badania
Gęstość betonu	kg/m ³	2479
Średnia zawartość powietrza całkowitego w mieszance betonowej	% obj.	4,4 (+/- 0,4)
Charakterystyka napowietrzenia mieszanki betonowej badana metodą AVA:	mm	0,210
- wskaźnik rozmieszczenia	% obj.	1,50
- zawartość mikroporów		
Konsystencja mieszanki betonowej mierzona opadem stożka	mm	40 (S2)
Wytrzymałość na ściskanie		
po 2 dniach, f_{cm2} , cube	MPa	22,2
po 7 dniach, f_{cm7} , cube	MPa	45,5
po 28 dniach, f_{cm28} , cube	MPa	59,1
Nasiąkliwość	% masy	4,3
Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem	mm	58
Mrozoodporność w obecności soli odladzającej:	złuszczenie [kg/m ²]	
- po 14 cyklach		0,10
- po 28 cyklach		0,15

Kolejnym przykładem realizacji nawierzchni drogowej z zastosowaniem cementu wieloskładnikowego jest droga lokalna łącząca miejscowości Ujazd oraz Zimna Wódka. Długość drogi to 5144 metrów. Do realizacji zastosowano cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 42,5 N, którego wybór był argumentowany uzyskaniem betonu o wysokiej odporności na oddziaływania zewnętrznych czynników korozyjnych (opady atmosferyczne, woda ze środkami odladzającymi, nawozy rolnicze). Nawierzchnia została ułożona na ulepszonym podłożu, którym była stara, polna nawierzchnia drogowa (rys.9).



Rys. 9. Budowa drogi lokalnej Ujazd-Zimna Wódka [materiały własne]

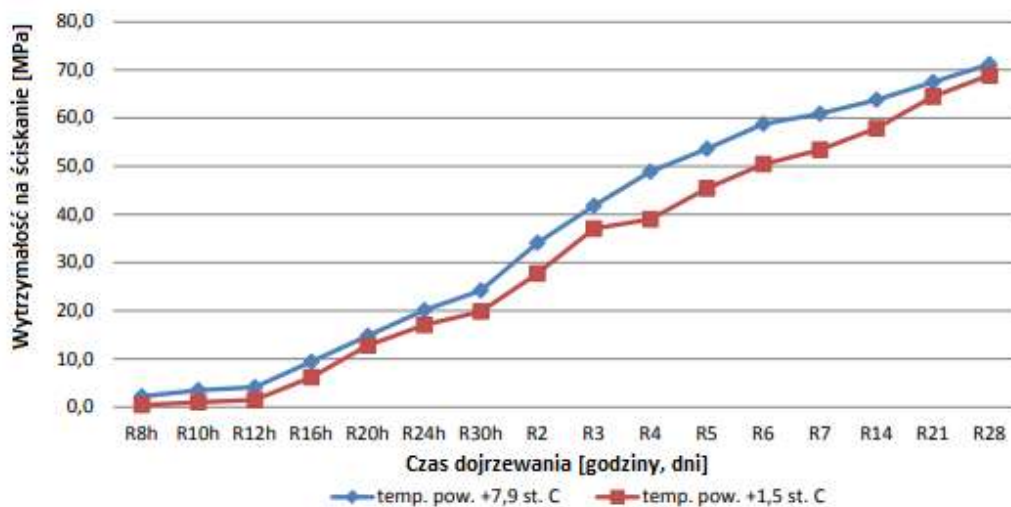
Prefabrykacja

Cementy inne niż portlandzkie CEM I, znajdują także zastosowanie w prefabrykacji, choć są to rzadkie przypadki. Prefabrykacja, ze względu na konieczność zapewnienia wysokiej wydajności produkcji (rotacja form), wymaga zastosowania cementu o krótkim czasie wiązania oraz wysokiej dynamice przyrostu wytrzymałości wczesnej. Przygotowanie mieszanki betonowej w zakładzie prefabrykacji pozwala na zastosowanie efektywnych domieszek upłynniających o krótkim czasie działania, co wpływa pozytywnie na skrócenie czasu wiązania oraz wysoki przyrost wytrzymałości wczesnej betonu. Przykładem zastosowania cementu niskoemisyjnego w prefabrykacji może być użycie cementu hutniczego CEM III/A 42,5 R-NA do wykonania prefabrykowanych elementów ochrony falochronu Xbloc w Świnoujściu. Widok gotowych elementów Xbloc przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Zabezpieczenie falochronu elementami prefabrykowanymi Xbloc w Świnoujściu [53]

Utrzymanie odpowiedniej konsystencji mieszanki betonowej oraz uzyskanie wysokiej wytrzymałości wczesnej uzyskano dzięki zastosowaniu nowoczesnego superplastyfikatora na bazie eterów polikarboksylowych. Elementy dojrzewały w warunkach naturalnych, dodatkowym utrudnieniem był fakt, iż większość produkcji realizowano w okresie jesienno-zimowym. Pomimo tego uzyskano wysokie wytrzymałości wczesne pozwalające na rozformowanie elementów po 20 godzinach i utrzymanie dobowego cyklu produkcji. Przyrost wytrzymałości na ściskanie betonu w zależności od temperatury dojrzewania przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Rozwój wytrzymałości na ściskanie betonu z zastosowaniem cementu hutniczego CEM III/A 42,5 R-NA [53]

Jak wykazały wyniki badań betonu, cement hutniczy CEM III/A 42,5 R-NA może być stosowany do produkcji elementów prefabrykowanych i betonów wysokowytrzymałościowych (rys.11). W prefabrykacji znajdują również zastosowanie cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A-L, CEM II A-S oraz CEM II/A-M 52,5N. Przykładem zastosowania może być produkcja bloków przeznaczonych do budowy ścian oporowych w systemie Beton Blok System za pomocą wibroprasy kroczącej (rys.12).



Rys. 12. Widok betonowych elementów prefabrykowanych wykonanych za pomocą wibroprasy kroczącej [materiały własne]

Cementy zawierające w swoim składzie mielony granulowany żużel wielkopiecowy, np. cementy portlandzkie żużlowe CEM II/ A,B-S, a także cement hutniczy CEM III/A 42,5 N(R), są chętnie stosowane w przypadku betonu barwionego. Wraz ze wzrostem zawartości zmielonego granulowanego żużla wielkopiecowego w składzie cementu wzrasta jego stopień białości, co

poprawia efektywność barwników [30]. Przykładem zastosowania cementu hutniczego CEM III/A 42,5N jest produkcja (barwionej w masie lub powierzchniowo) kostki brukowej za pomocą wibroprasy kroczącej (rys. 13).



Rys. 13. Przykład zastosowania cementu hutniczego CEM III/A 42,5N - LH/HSR/NA do produkcji kostki brukowej [113]

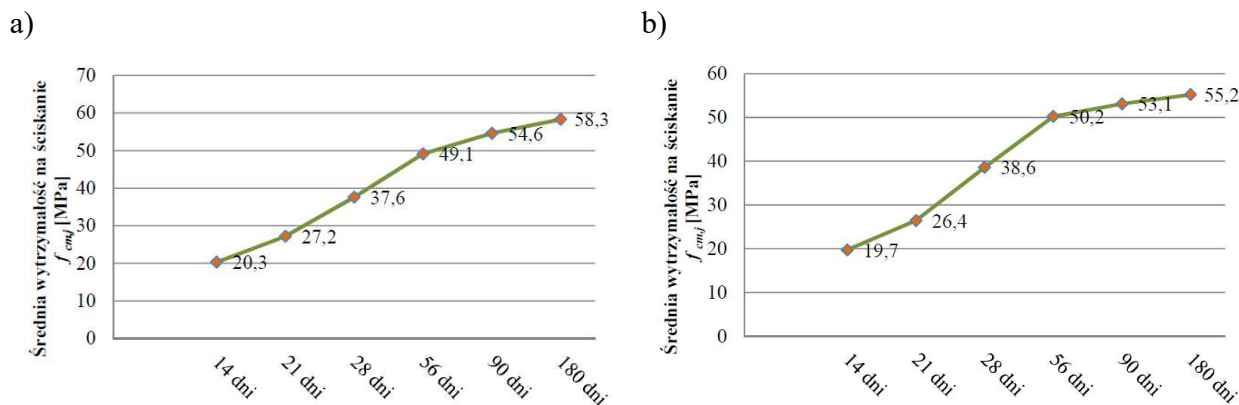
Konstrukcje masywne

Cementy wieloskładnikowe CEM II/B÷CEM V, ze względu na swoje właściwości (niskie ciepło hydratacji LH oraz ograniczony skurcz), są coraz chętniej stosowane do wykonywania betonowych konstrukcji masywnych. Przykładem tego typu zastosowania może być budowa płyty fundamentowej pod młyn cementu w cementowni Góraździe. Proces zabudowy mieszanki betonowej pokazano na rys. 14.

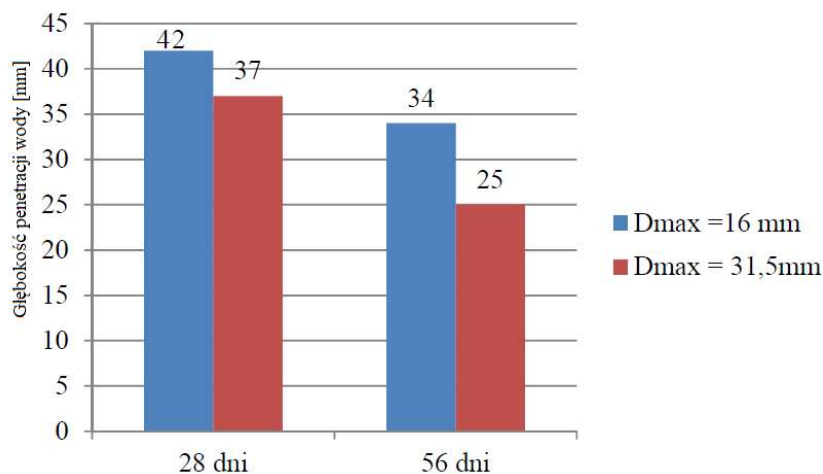


Rys. 14. Zabudowa betonu w konstrukcji fundamentu młynowni w Cementowni Góraździe 2011 r.

Łączna objętość fundamentu wyniosła 5090 m³, betonowanie prowadzono w trzech etapach. Do wykonania betonu klasy wytrzymałości na ściskanie C30/37 użyto cementu wieloskładnikowego CEM V/A (S-V) 32,5R-LH wraz z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego. Odpowiedni dobór jakościowy i ilościowy składników betonu, a także odpowiednia pielęgnacja ciepło-wilgotnościowa, pozwoliły na uzyskanie fundamentu bez zarysowań termicznych oraz skurczowych. Wyniki badań stwardniałego betonu przedstawiono na rysunkach. 15 i 16.



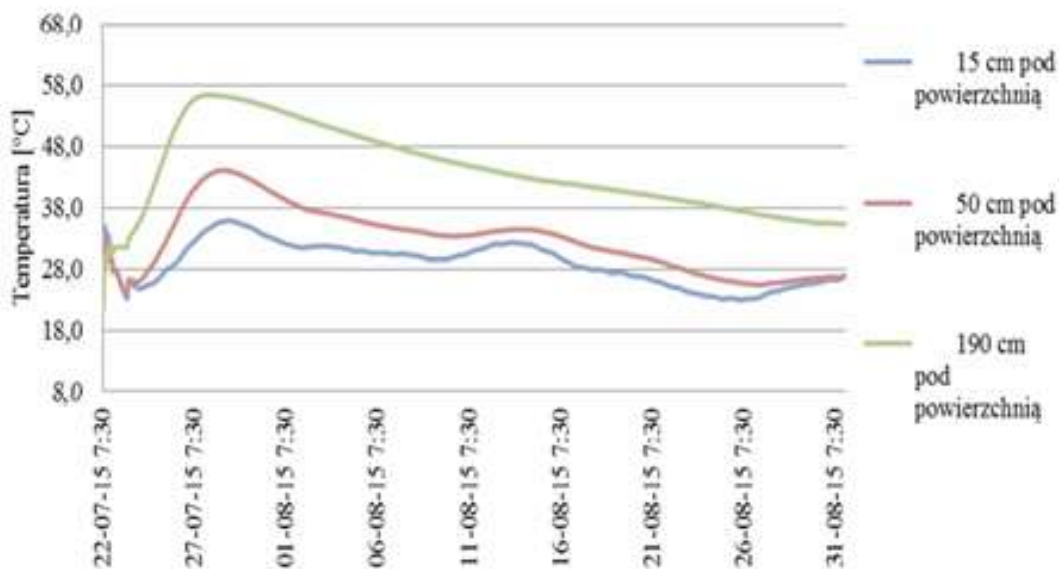
Rys. 15. Rozwój wytrzymałości na ściskanie w czasie dojrzewania ($f_{cm,j}$) betonu wykonanego z zastosowaniem kruszywa: a) $D_{max} = 16$ mm b) $D_{max} = 31,5$ mm [38]



Rys. 16. Średnia głębokość penetracji wody dla stopnia wodoszczelności W8 betonów zastosowanych w konstrukcji fundamentu pod młyn cementu [38]

Przykładem zastosowania cementów niskoemisyjnych (cementów hutniczych CEM III/A,B) w konstrukcjach masywnych jest również budowa bloków energetycznych 5 i 6 w Elektrowni Opole. Do budowy płyty fundamentowej o wymiarach – 108 m długości, 51 m szerokości i zmiennej wysokości od 1,7 m do 3,5 m, zastosowano beton wykonany z użyciem cementu hutniczego CEM III/A 32,5N – LH/HSR/NA oraz cementu hutniczego CEM III/B 42,5L LH. W składzie betonu stosowano również dodatek popiołu lotnego

w ilościach ok 33% masy w stosunku do masy cementu. W celu weryfikacji założeń projektowych oraz odpowiedniego prowadzenia procesu pielęgnacji ciepłno-wilgotnościowej, w elementach zabudowano sondy z rozmieszczonymi, na różnych głębokościach, czujnikami temperatury. Uzyskane wyniki pomiarów zmian temperatury przedstawiono na rys. 17.



Rys. 17. Wyniki pomiarów zmiany temperatury betonu w czasie twardnienia na różnych wysokościach dla punktu pomiarowego 942 [38]

Maksymalna zarejestrowana temperatura wnętrza betonu wyniosła 57,8°C, natomiast maksymalny gradient temperatury, pomiędzy wnętrzem a powierzchnią betonu, wyniósł 14,2°C/metr, co pozwoliło uniknąć powstania zarysowań betonu na skutek naprężeń termicznych. Wyniki badań betonu stwardniałego przedstawiono w tabeli 13.

Tabela 13. Wyniki badań betonu przeznaczonego na wykonaniu fundamentów w Elektrowni Opole [38]

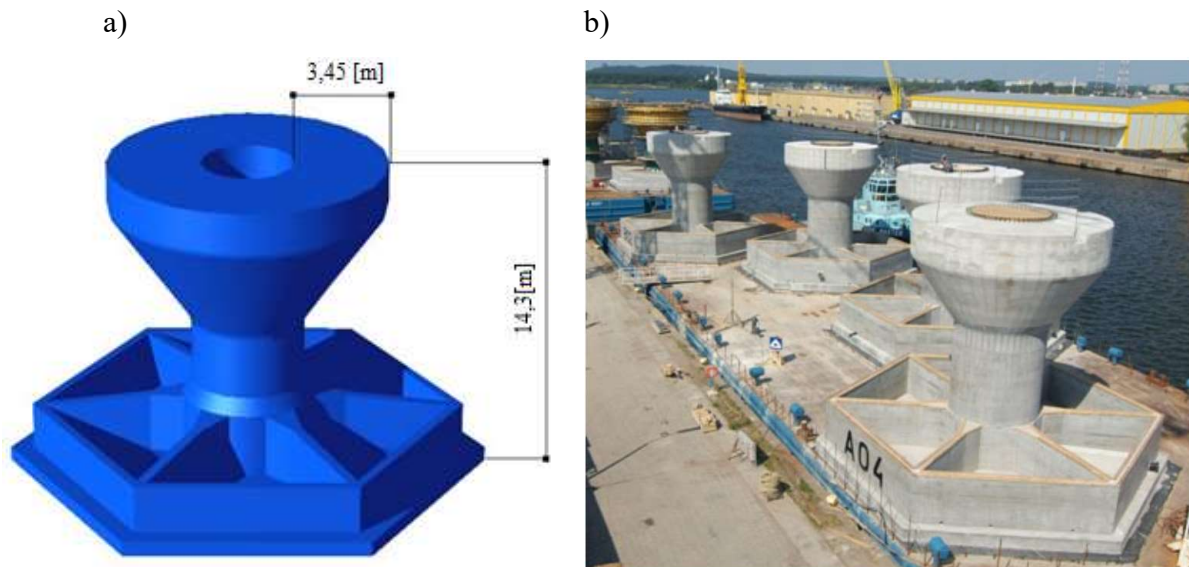
Fundament kotłowni		Nr 5	Nr 6
Właściwość	Jednostka	Wynik badania	
Wytrzymałość na ściskanie:			
• po 2 dniach, $f_{cm2, cube}$	MPa	2,0	2,2
• po 7 dniach, $f_{cm7, cube}$		13,2	15,3
• po 28 dniach, $f_{cm28, cube}$		36,8	49,4
• po 90 dniach, $f_{cm90, cube}$		58,9	64,2
Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem po 90 dniach dojrzewania	mm	35,0	28,0
Mrozoodporność (F150) wg PN-88/B-06250 po 90 dniach dojrzewania			
- spadek wytrzymałości na ściskanie	%	13,9	11,1
- ubytek masy	%	0,2	0,1

Rodzaj zastosowanych cementów oraz dodatku typu II w postaci popiołu lotnego krzemionkowego spowodował znaczny przyrost wytrzymałości na ściskanie w okresie pomiędzy 28 a 90-dniem dojrzewania. Wysoka szczelność betonu, pomimo braku zastosowania domieszki napowietrzającej, pozwoliła na spełnienie wymagań dla stopnia mrozoodporności betonu F150.

Betony samozagęszczalne SCC oraz betony wysokiej wytrzymałości BWW

Obecnie cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A,B są coraz powszechniej stosowane przy produkcji betonów samozagęszczalnych (SCC) i betonów wysokiej wytrzymałości (BWW). Stosowanie betonów wysokiej wytrzymałości pozwala na ograniczenie przekrojów elementów żelbetowych, efektem jest zmniejszenie zapotrzebowania na beton i stal zbrojeniową. Pomimo zwiększonej zawartości cementu w 1m^3 betonu wysokowytrzymałościowego, w porównaniu z betonem zwykłym, wykorzystanie cementu jest bardziej efektywne i pozwala na obniżenie sumarycznego zużycia cementu przy założeniu jednakowej nośności przekroju żelbetowego. Zastosowanie betonów, BWW w porównaniu do betonów zwykłych ogranicza również zużycie kruszyw oraz wody, co wpisuje się w gospodarkę zrównoważonego rozwoju [3,76]. Stosowanie cementów wieloskładnikowych przy produkcji betonu wysokiej wytrzymałości ma miejsce pomimo, iż do ich wykonania zaleca się głównie stosowanie cementów portlandzkich CEM I (najlepiej klasy wytrzymałościowej 42,5 i 52,5). Wynika to z korzystnych właściwości cementów wieloskładnikowych, kształtujących podwyższoną trwałość konstrukcji betonowych [10,47]. Oczywiście, wysoka klasa wytrzymałościowa cementów wieloskładnikowych jest także pożądana.

Przykładem zastosowania cementu niskoemisyjnego w betonie wysokowytrzymałościowym jest budowa prefabrykowanych fundamentów morskich elektrowni wiatrowych. Prace związane z prefabrykacją stóp fundamentowych prowadzono w Świnoujściu w roku 2003 oraz 2006r., natomiast stopy posadowiono na dnie morza na południowym wybrzeżu Danii. Do wykonania stóp fundamentowych użyto cementu hutniczego CEM III/A 32,5N - LH/HSR/NA z 5% dodatkiem pyłu krzemionkowego. Ze względu na warunki pracy betonu wyspecyfikowano następujące klasy ekspozycji: XC4, XF4, XS3, XM3. Na rys. 18 przedstawiono projekt oraz widok gotowej stopy fundamentowej [16].



Rys. 18. Fundament elektrowni wiatrowej wykonanej z użyciem cementu hutniczego CEM III/A 32,5N - LH/HSR/NA: a) projekt b) widok fundamentu przed transportem na miejsce wbudowania [16]

Cementy CEM II÷CEM VI, zawierające składniki główne inne niż klinkier portlandzki, mogą być z powodzeniem stosowane do produkcji betonów samozagęszczalnych SCC. W betonie samozagęszczalnym można stosować wszystkie rodzaje cementów, brak jest formalnych wytycznych w tym obszarze. Jednak ze względów technologicznych, przy wyborze cementu do zastosowania w betonie samozagęszczalnym, należy wziąć pod uwagę właściwości istotne dla uzyskania płynności, lepkości i stabilności mieszanki betonowej tj. stopień rozdrobnienia cementu oraz jego skład i wodożądność. Cement o wyższej powierzchni właściwej charakteryzuje się wyższą wodożądnością, co wymusza zastosowanie wyższej ilości superplastyfikatora. Z drugiej strony wzrost powierzchni właściwej pozwala na uzyskanie lepszej stabilności mieszanki betonowej [37].

Przykładem rozwiązania betonu samozagęszczalnego z użyciem cementów niskoemisyjnych jest budowa przyczółków wiaduktów węzła komunikacyjnego Sośnica. Skomplikowana geometria zbrojenia przyczółków wiaduktu WD464 uniemożliwiła poprawne ułożenie i zagęszczenie mieszanki betonowej przy użyciu wibratorów wgłębnych. Problemem był także spodziewany znaczny samonagrzew masywu betonowego o łącznej objętości 3000 m³. Po przeprowadzeniu szczegółowej symulacji komputerowej rozkładu temperatur i naprężeń w elemencie, wykluczono zastosowanie cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Wiązało się to ze sporym ryzykiem wystąpienia spękań konstrukcji. Do wykonania betonu samozagęszczalnego w klasie wytrzymałości na ściskanie C30/37 użyto cementu hutniczego CEM III/A 32,5 LH/HSR/NA. Na rys. 19 przedstawiono przyczółki wiaduktu WD 464 [46].



Rys. 19. Przyczółek obiektu WD 464 - węzeł Sośnica w Gliwicach [114]

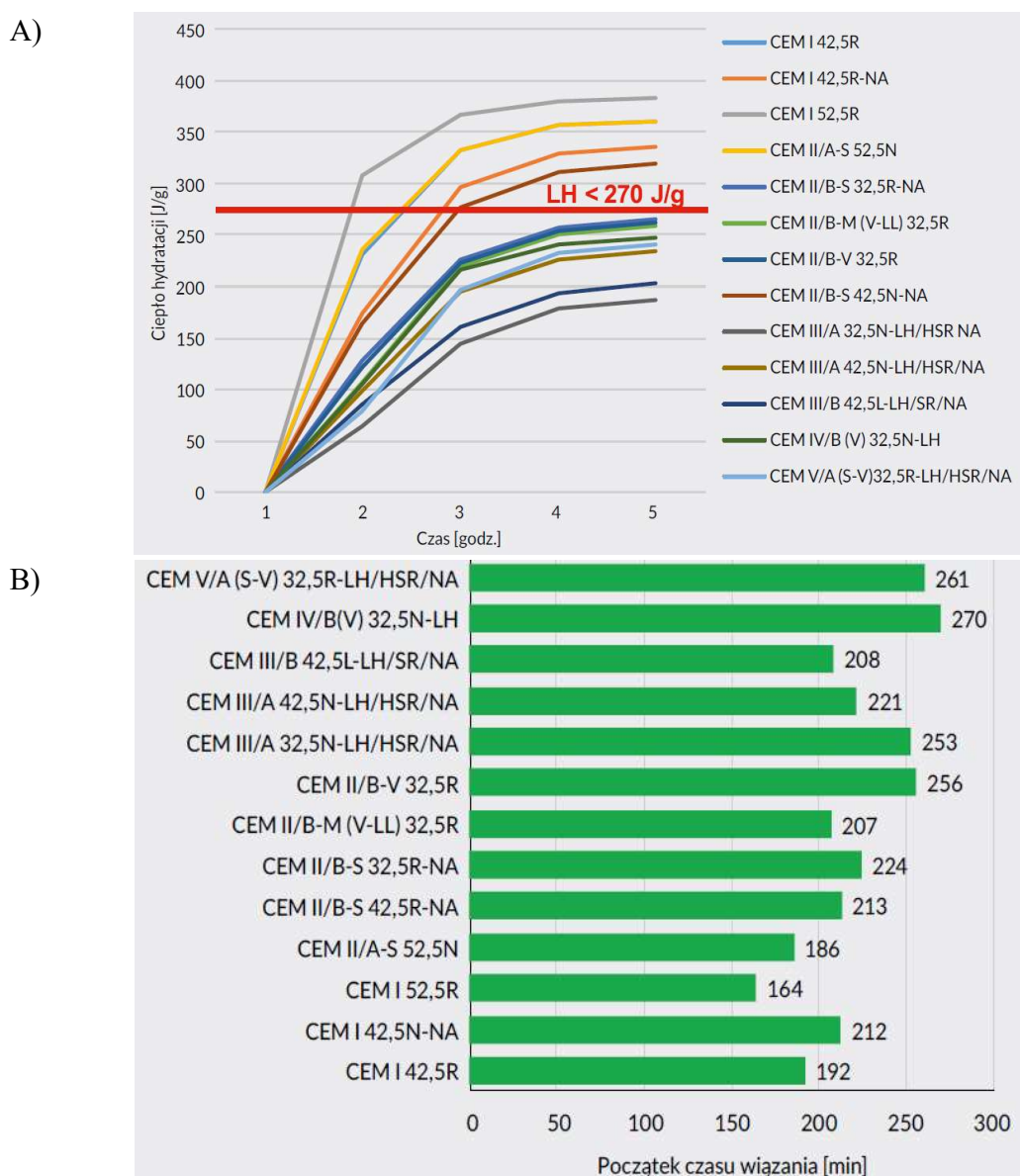
Reasumując należy stwierdzić, iż podane przykłady świadczą o możliwym szerszym stosowaniu cementów wieloskładnikowych CEM II÷CEMVI w różnych obszarach budownictwa. Jednak w większości przypadków dotyczą stosowania cementów zawierających w swoim składzie popiół lotny krzemionkowy (V) i/lub granulowany żużel wielkopiecowy (S), których dostępność na rynku w następnych latach może być mocno ograniczona. Rozwiązaniem powyższego problemu branży cementowej może być zwiększenie zawartości wapienia w składzie cementu. Wapień jest jednym z podstawowych surowców wykorzystywanych do produkcji klinkieru portlandzkiego, co czyni go ogólnie dostępnym dla producentów cementu. Dlatego też jest on powszechnie stosowany jako składnik drugorzędny cementu [29,56]. Wapień może być składnikiem głównym w składzie cementów portlandzkich wieloskładnikowych popiołowo-wapiennych CEM II/A, B-M (V-LL) oraz cementów wieloskładnikowych żużlowo-wapiennych CEM II/A, B-M (S-LL) [31,55,67].

3.3. Czynniki ograniczające szerokie stosowanie cementów niskoemisyjnych w budownictwie

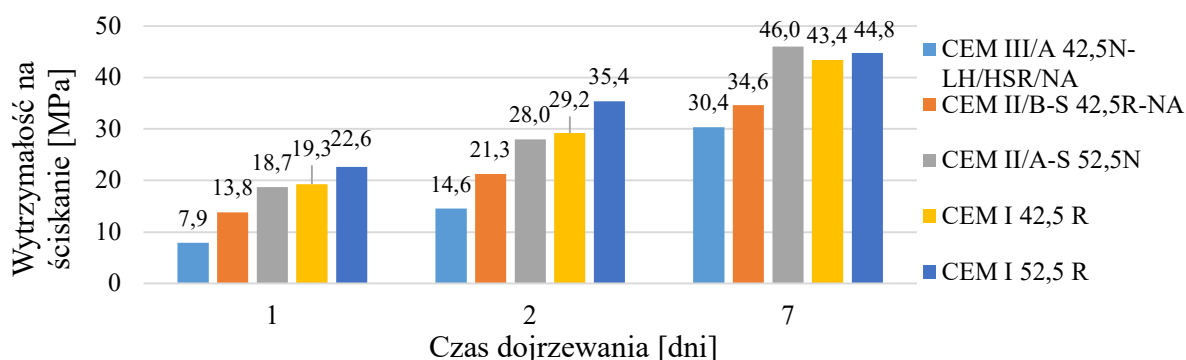
Obecnie w budownictwie dąży się do zoptymalizowania czasu niezbędnego na wykonanie elementu, obiektu czy konstrukcji. Jest to związane m.in. z wysokimi kosztami utrzymania placu budowy, dążeniem do dotrzymania terminów realizacji robót, optymalizacją wydajności zakładów prefabrykacji. W przypadku wykonywania elementów betonowych oraz żelbetowych, w technologii monolitycznej, istotnym czynnikiem skłaniającym do stosowania betonów o dynamicznym rozwoju wytrzymałości wczesnej są wysokie koszty wynajmu deskowań, rusztowań oraz dźwigów i żurawi budowlanych. Wymagania współczesnego budownictwa prowadzą również do konieczności wykonywania konstrukcji betonowych, żelbetowych w warunkach obniżonych temperatur, a także w warunkach zimowych.

Właściwości cementów niskoemisyjnych

Wysokie ciepło hydratacji (rys. 20A), krótki czas początku wiązania (rys. 20B) oraz szybki przyrost wytrzymałości wczesnej cementów portlandzkich CEM I, zwłaszcza klas wytrzymałościowych 42,5 i 52,5 (rys. 21), pozwala zminimalizować niezbędny czas pielęgnacji cieplno-wilgotnościowej betonu i kontynuować prace budowlane. Obniżone ciepło hydratacji cementów wieloskładnikowych CEM II÷CEM VI związane jest głównie z zmniejszoną zawartością klinkieru portlandzkiego w składzie cementu.



Rys. 20. Właściwości cementów: A) ciepło hydratacji; B) początek czasu wiązania cementów [115]

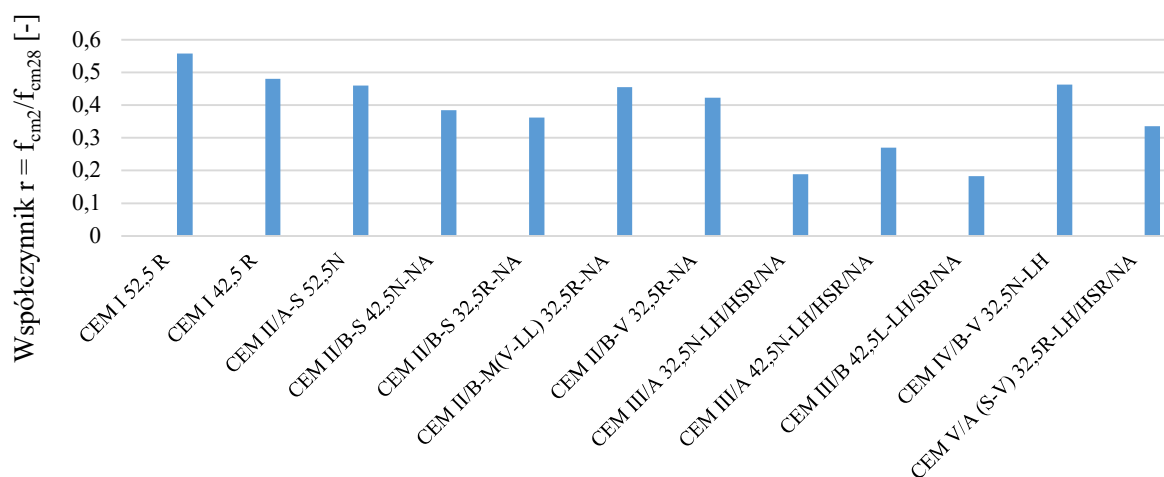


Rys. 21. Wczesna wytrzymałość na ściskanie wybranych cementów w temp. +20°C [115]

Przedstawione na rys. 20 i 21 właściwości cementów niskoemisyjnych powodują, iż są one niechętnie stosowane w okresie jesienno-zimowym, kiedy to stosowanie cementów portlandzkich CEM I wydaje się być szczególnie uzasadnione. Nie wyklucza to jednak możliwości stosowania cementów niskoemisyjnych, lecz osiągnięcie zbliżonych właściwości betonów wykonanych z użyciem cementów niskoemisyjnych może wymagać szeregu zabiegów technologicznych takich jak: obniżenie stosunku w/c, zastosowanie domieszek przyspieszających wiązanie i twardnienie, optymalnego doboru uziarnienia kruszywa, zwiększenie zawartości cementu oraz odpowiedniej pielęgnacji ciepło-wilgotnościowej betonu.

Wydłużony czas pielęgnacji betonu

Norma PN-EN 13670:2011 [91] definiuje minimalny okres pielęgnacji betonu, który jest uzależniony od klasy pielęgnacji (klasy pielęgnacji od 1 do 4), temperatury powierzchni betonu oraz dynamiki rozwoju wytrzymałości na ściskanie betonu (współczynnik $r = f_{cm2}/f_{cm28}$). Na rysunku 22 przedstawiono współczynnik r dla wybranych cementów powszechnego użytku (wyniki uzyskano na zaprawie normowej).



Rys. 22. Rozwój wytrzymałości na ściskanie wybranych cementów powszechnego użytku (współczynnik $r = f_{cm2}/f_{cm28}$)

W normie PN-EN 206 [95] określono klasyfikację rozwoju wytrzymałości na ściskanie betonu w zależności od stosunku średniej 2-dniowej wytrzymałości na ściskanie $f_{cm,2}$ oraz średniej 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie $f_{cm,28}$. Klasyfikację przedstawiono w tabeli 14.

Tabela 14. Rozwój wytrzymałości betonu w temperaturze 20°C [95]

Rozwój wytrzymałości	Współczynnik wytrzymałości $r=f_{cm,2}/f_{cm,28}$
Szybki	$\geq 0,5$
Umiarkowany	od $\geq 0,3$ do $< 0,5$
Wolny	od $\geq 0,15$ do $< 0,3$
Bardzo wolny	$< 0,15$

Wraz ze spadkiem współczynnika r oraz obniżeniem temperatury powierzchni betonu wymagany okres pielęgnacji ulega wydłużeniu. Wymagania poziomu wytrzymałości na ściskanie betonu dla poszczególnych klas pielęgnacji, zgodne z normą PN-EN 13670:2011 [91], przedstawiono w tabeli 15.

Tabela 15. Klasy pielęgnacji betonu wg PN-EN 13670:2011 [91]

	Klasa pielęgnacji 1	Klasa pielęgnacji 2	Klasa pielęgnacji 3	Klasa pielęgnacji 4
Czas (godziny)	12 ^a	NA	NA	NA
Procent wymaganej wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie po 28 dniach	Nie stosuje się (NA)	35%	50%	70%

^{a)} Pod warunkiem, że wiązanie nie trwa dłużej niż 5 godzin, a temperatura powierzchni betonu jest równa 5°C lub wyższa.

Dla klas pielęgnacji 2, 3 oraz 4 minimalny okres pielęgnacji uzależniony jest od dynamiki rozwoju wytrzymałości na ściskanie betonu w warunkach normowych (stosunek $r=f_{cm,2}/f_{cm,28}$) oraz warunków dojrzewania (temperatury powierzchni betonu). Minimalne okresy pielęgnacji betonu w klasie pielęgnacji 4 przedstawiono w tabeli 16.

Tabela 16. Minimalny okres pielęgnacji dla klasy pielęgnacji 4 wg PN-EN 13670:2011 [91]

Temperatura powierzchni betonu (t), °C	Minimalny okres pielęgnacji, dni ^a		
	Rozwój wytrzymałości na ściskanie ^{c,d}		
	$(f_{cm2}/f_{cm28}) = r$		
	szybki $r \geq 0,50$	średni $0,50 > r \geq 0,30$	wolny $0,30 > r \geq 0,15$
$t \geq 25$	3	5	6
$25 > t \geq 15$	5	9	12
$15 > t \geq 10$	7	13	21
$10 > t \geq 5$ ^b	9	18	30

^a Plus każdy okres wiązania przekraczający 5 h.

^b Zaleca się, aby przy temperaturze poniżej 5 °C czas pielęgnacji był wydłużony o czas, w którym temperatura jest poniżej 5 °C.

^c Rozwój wytrzymałości betonu jest mierzony stosunkiem średniej wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach do średniej wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, wyznaczonych w badaniach wstępnych lub na podstawie znanych właściwości betonu o porównywalnym składzie (patrz EN 206-1).

^d W przypadku bardzo powolnego rozwoju wytrzymałości betonu, zaleca się, aby szczególne wymagania były podane w specyfikacji wykonawczej.

Należy zaznaczyć, że zgodnie z zapisami normy PN-EN 13670:2011 [91] minimalny okres pielęgnacji należy wydłużyć o okres początku wiązania powyżej 5 godzin. Minimalny okres pielęgnacji należy także wydłużyć o czas w którym temperatura powierzchni betonu spadła poniżej 5°C.

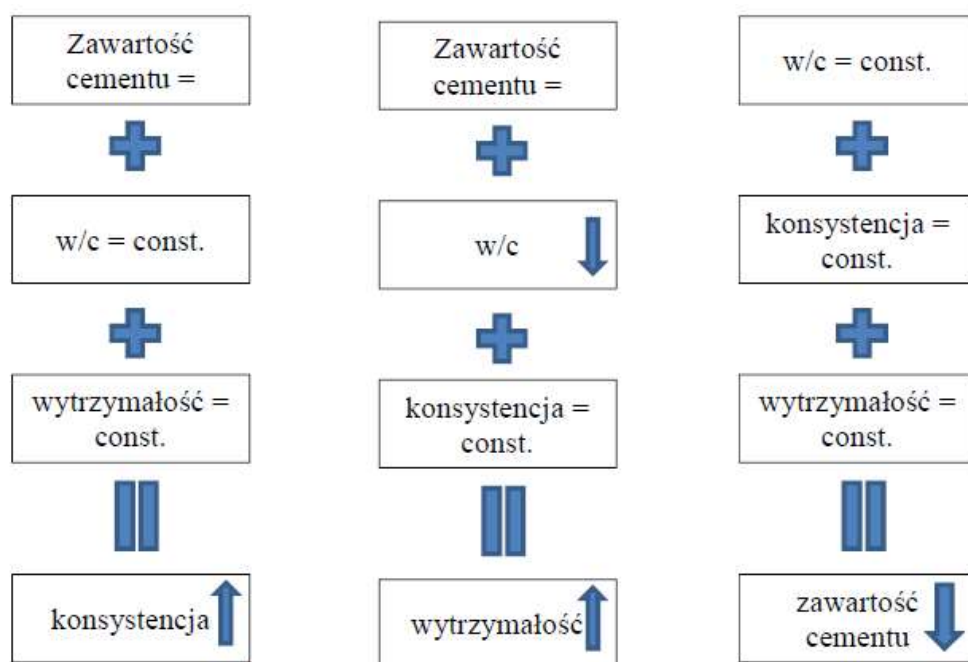
Reasumując, cementy niskoemisyjne CEM II÷CEM VI charakteryzują się wolniejszym rozwojem wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do cementów portlandzkich CEM I, a więc ich zastosowanie będzie wiązało się z koniecznością stosowania wydłużonego okresu pielęgnacji betonu, zwłaszcza w warunkach obniżonych temperatur zewnętrznych.

Kompatybilność cementów niskoemisyjnych z domieszkami

Zgodnie z definicją zawartą w normie PN-EN 206 [95] „domieszkę stanowi składnik dodawany podczas procesu mieszania betonu w małych ilościach w stosunku do masy cementu w celu modyfikacji właściwości mieszanki betonowej lub betonu stwardniałego”. Ilość składnika traktowanego jako „domieszka” nie powinna przekraczać 5% masy cementu.

Stosowanie cementów niskoemisyjnych CEM II÷CEMVI wymagać będzie badań pozwalających ocenić kompatybilność stosowanych domieszek oraz cementu. W przypadku cementów niskoemisyjnych, a zwłaszcza cementów trójskładnikowych, wpływ poszczególnych składników cementu na efektywność działania domieszki jest zróżnicowany [5,50,58,63]. Obecnie beton konstrukcyjny nie zawierający domieszek jest czymś wyjątkowym. Szerokie stosowanie domieszek, jako składnika betonu, jest spowodowane znaczącymi korzyściami ekonomicznymi oraz technicznymi wynikającymi z ich użycia w składzie betonu. Stosowanie najnowszej generacji innowacyjnych domieszek daje także możliwość zwiększenia wykorzystania w budownictwie

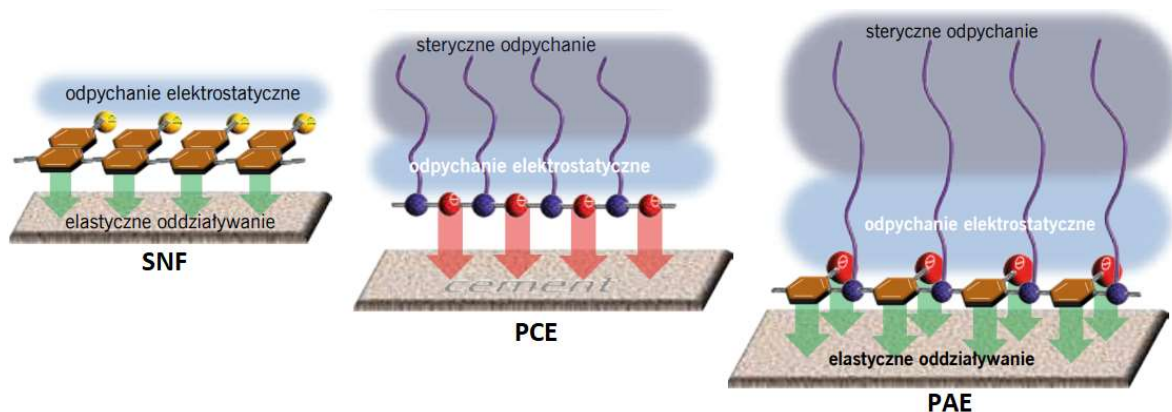
betonów z cementów wieloskładnikowych CEM II÷CEM VI oraz szerszego stosowania dodatków typu I i II w składzie betonu [71]. Stosowanie domieszek może w znacznym stopniu wpływać na poziom emisji CO₂ przypadającej na wyprodukowanie 1m³ produktu, pozwalając przy tym na uzyskanie odpowiednio urabialnej mieszanki betonowej oraz wytrzymałego i trwałego betonu. Do najczęściej stosowanych domieszek (70-75% rynku) należą domieszki uplastyczniające (plastyfikatory) oraz upłynniające (superplastyfikatory) [61]. W zależności od celu stosowania domieszek uplastyczniających i upłynniających ich użycie może prowadzić do poprawy konsystencji mieszanki betonowej, zwiększenia wytrzymałości betonu (obniżenie stosunku w/c) oraz obniżenia zużycia cementu w składzie betonu (rys. 23) [38].



Rys. 23. Efekty stosowania domieszek uplastyczniających i upłynniających w składzie betonu [38]

Zastąpienie części klinkieru portlandzkiego składnikiem o większym stopniu rozdrobnienia powoduje wzrost powierzchni właściwej cementu, co skutkuje zwiększeniem objętości wody fizycznie związanej i zmniejszeniem udziału wody wolnej. Skutkuje to pogorszeniem właściwości reologicznych. Stosowanie typowych domieszek na bazie eteru polikarboksyłowego (PCE) może okazać się nieefektywne i wymagać zwiększonego dozowania domieszki, co skutkuje znacznym wzrostem lepkości mieszanki betonowej, problemami z utrzymaniem założonej konsystencji oraz uzyskaniem prawidłowego poziomu napowietrzenia w przypadku wykonywania betonów mrozoodpornych. Na uzyskanie prawidłowych właściwości mieszanki betonowej z zastosowaniem cementów niskoemisyjnych, przy równoczesnym obniżonym stosunku wodno-cementowym, może pozwolić zastosowanie nowego rodzaju domieszek typu PAE (na bazie esteru poliakrylowego) [11,52]. Mechanizm działania domieszek typu PAE polega na jednoczesnym

wykorzystaniu dwóch mechanizmów dyspersji ziaren cementu: mechanizmu elektrostatycznego oraz mechanizmu sterycznego (rys. 24) [51].



Rys. 24. Mechanizm działania domieszek typu SNF, PCE oraz PAE [51]

Zastosowanie domieszek typu PAE umożliwia obniżenie lepkości mieszanki betonowej, o niskim stosunku wodno-cementowym, przy zachowaniu założonej klasy konsystencji.

Szersze stosowanie cementów wieloskładnikowych w budownictwie warunkowane jest kompatybilnością w układzie kilku domieszek np. domieszki napowietrzającej z domieszką, przyspieszającą wiązanie i twardnienie lub domieszką ograniczającą skurcz, a także inhibitorami korozji stali.

Stosowanie cementów niskoemisyjnych może skutkować obniżoną ochroną stali zbrojeniowej przed korozją. Zgodnie z Eurokodem 2 [104] zapewnienie odpowiedniego okresu trwałości elementu żelbetowego należy zapewnić poprzez odpowiednią grubość i jakość otuliny. Wraz ze spadkiem zawartości klinkieru portlandzkiego w składzie cementu (betonu) obniżeniu ulega ilość $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pochodzącego z hydratacji faz krzemianowych klinkieru portlandzkiego, który dodatkowo wchodzi w reakcję z aktywnymi (nieklinkierowymi) składnikami głównymi cementu, co skutkuje obniżeniem odczynu pH w porach betonu. Obniżenie odczynu pH zachodzi również na skutek korozji betonu związanej z karbonatyzacją. Odczyn pH poniżej $11,0 \div 11,8$ powoduje ryzyko depasywacji stali zbrojeniowej. Szybkość procesu karbonatyzacji betonu spada wraz ze wzrostem szczelności mikrostruktury betonu [15,41,77,86]. Ryzyko korozji stali zbrojeniowej w betonie niskoemisyjnym można ograniczyć poprzez zwiększenie grubości otuliny, zastosowanie powłok ochronnych betonu, zastosowanie zbrojenia ze stali nierdzewnej lub zbrojenia kompozytowego oraz zastosowanie inhibitorów korozji stali, które podwyższają energię procesów korozyjnych [45,75,86].

Wiele zastosowań betonu w budownictwie kubaturowym oraz infrastrukturalnym wymaga uzyskania przez beton odpowiedniej mrozoodporności. Jak pokazują wyniki badań [26] uzyskanie betonu mrozoodpornego z zastosowaniem cementów wieloskładnikowych jest możliwe, a na poziom mrozoodporności, poza składem betonu (zwłaszcza ilość i jakość popiołu lotnego), ma także wpływ wiele czynników takich jak: charakterystyka rozkładu mikroporów w betonie (właściwe napowietrzenie) oraz sposób transportu i zagęszczenia mieszanki betonowej, okres

dojrzewania, sposób pielęgnacji, metoda badania (zwykła, powierzchniowa) [35,57,74]. Wymagania dotyczące zawartości powietrza w mieszance betonowej dla betonu konstrukcyjnego w drogowych obiektach inżynierskich przedstawiono w tabeli 17.

Tabela 17. Wartości graniczne zawartości powietrza w mieszance betonowej dla betonu konstrukcyjnego wg M-13.01.00v3 [18]

Wymiar kruszywa D, [mm]	Etap wykonywania badań		Tolerancja pomiarowa [%]
	Projektowanie składu mieszanki betonowej [% obj.]	Zatwierdzenie receptury, próba technologiczna, kontrola jakości robót [% obj.]	
16,0	4,5 ÷ 6,0	4,5 ÷ 6,5	-0,5
22,4	4,0 ÷ 5,5	4,0 ÷ 6,0	+1,0
31,5	4,0 ÷ 5,5	4,0 ÷ 6,0	

Wymagania dotyczące napowietrzenia zdefiniowano także w OST D-05.03.04v02 [116] N (tabela 18). Dla betonu nawierzchniowego, oprócz poziomu zawartości powietrza w mieszance betonowej, wymaga się dodatkowo odpowiedniej struktury napowietrzenia betonu stwardniałego. Zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3mm (A300) $\geq 1,5$ [% obj.] oraz wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie $\bar{L} \leq 0,200$ [mm] [116]

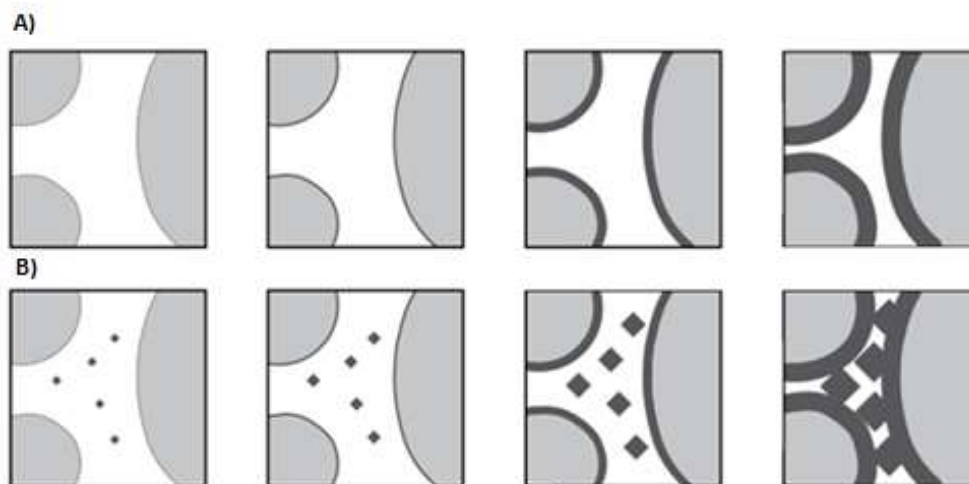
Tabela 18. Wymagania dotyczące napowietrzenia dla betonu nawierzchniowego wg D-05.03.04 v02 [116]

Wymiar kruszywa D, [mm]	Etap wykonywania badań		Tolerancja pomiarowa [% obj.]
	Projektowanie składu mieszanki betonowej [% obj.]	Zatwierdzenie receptury, próba technologiczna, kontrola jakości robót [% obj.]	
8,0	5,0 ÷ 6,5	5,0 ÷ 6,5	-0,5
16,0; 22,4	4,5 ÷ 6,0	4,5 ÷ 6,0	+1,0
31,5	4,0 ÷ 5,5	4,0 ÷ 5,5	

Jak wykazano w badaniach [34,35,48], zastosowanie domieszki napowietrzającej oraz uzyskanie prawidłowego poziomu napowietrzenia mieszanki betonowej nie gwarantuje uzyskania prawidłowej struktury rozkładu porów w betonie stwardniałym. Najistotniejszym czynnikiem jest kompatybilność domieszki napowietrzającej z cementem i wytworzenie mikroporów o średnicy $< 0,3$ mm oraz równomiernie ich rozmieszczenie w objętości mieszanki betonowej. Jednak na ostateczną charakterystykę rozkładu porów betonu w konstrukcji ma wpływ szereg czynników. Transport mieszanki betonowej za pomocą pompy powoduje ubytek zawartości powietrza o ok. 1-1,5%. Problematiczne jest również uzyskanie prawidłowej struktury napowietrzenia w betonach o wysokiej ciekłości. Wysoka ciekłość mieszanki nie sprzyja utrzymywaniu się drobnych

pęcherzyków powietrza w mieszance betonowej. Powyższe problemy można znacznie ograniczyć poprzez zastosowanie alternatywnego sposobu napowietrzenia przy użyciu stałych cząstek tzw. mikrosfer [68,69]. Główną zaletą mikrosfer są ich stałe wymiary oraz możliwość kształtowania struktury napowietrzenia, która bezpośrednio przekłada się na rozkład porów w stwardniałym betonie. Jest to szczególnie istotne w przypadku wykonywania betonów mrozoodpornych z użyciem cementów niskoemisyjnych [59,83].

Jedną z efektywnych metod uzyskiwania wyższych początkowych wytrzymałości na ściskanie betonów z użyciem cementów wieloskładnikowych jest stosowanie domieszek przyspieszających wiązanie i twardnienie cementu (betonu). Zastosowanie tradycyjnych domieszek przyspieszających wiązanie i twardnienie może powodować spadek wytrzymałości w dłuższym okresie dojrzewania. W przypadku zastosowania cementów wieloskładnikowych CEM II efekt ten może być częściowo kompensowany wyższą dynamiką przyrostu wytrzymałości w późniejszej fazie dojrzewania (pomiędzy 28 a 90-dniem). Jednym z pierwszych środków stosowanych jako przyspieszacz wiązania cementu był chlorek wapnia. Charakteryzował się on wysoką efektywnością [6]. Obecnie został jednak wyeliminowany ze względu na negatywny wpływ chlorków na proces korozji stali zbrojeniowej oraz zmniejszenie trwałości konstrukcji żelbetowych. Aktualnie w technologii betonu stosuje się głównie bezchlorkowe domieszki na bazie azotanów (III, V), rodanku potasu (stosowany zwłaszcza w warunkach obniżonej temperatury) oraz związków organicznych, np. trójetanoloaminy, mrówczanu wapnia, a także kwasów karboksylowych, formaldehydu lub żywic fenolowych [60]. W ostatnich latach na rynku pojawiły się nowe domieszki przyspieszające wiązanie i twardnienie kompozytów cementowych zawierające zarodki fazy C-S-H. Dzięki temu proces tworzenia się fazy C-S-H ulega przyspieszeniu i zachodzi nie tylko na powierzchni ziaren cementu, a także w przestrzeni międzyziarnowej (porach). Porównanie rozwoju struktury zaczynu cementowego, bez oraz z zastosowaniem domieszki z zarodkami fazy C-S-H, przedstawiono na rys. 25. Ten rodzaj domieszek nie wpływa negatywnie na wytrzymałość betonu w okresie normowym (28 dni).



Rys. 25. Rozwój struktury zaczynu cementowego : A) bez domieszki, B) z domieszką zawierającą zarodki fazy C-S-H [60]

Poza oddziaływaniem chemicznym, przyspieszenie wiązania cementu oraz uzyskanie wyższych wytrzymałości wczesnych, można również osiągnąć wykorzystując efekt fizycznego wypełnienia struktury poprzez dodatek pyłu mineralnego, np. zmielonego wapienia (uzupełnienie stosu kruszywowego na poziomie nano i mikro).

Obniżanie współczynnika w/c, wzrost temperatury dojrzewania betonu, zastosowanie nowoczesnych domieszek przyspieszających wiązanie i twardnienie betonu, a także wykorzystanie efektu nukleacji z użyciem ziaren zmielonego kamienia wapiennego, są efektywnymi sposobami na wzrost wytrzymałości wczesnej, skrócenie czasu wiązania cementów niskoemisyjnych, a zatem zwiększenie ich przydatności w budownictwie [6,8,13].

Aspekty ekologiczne związane z szerszym stosowaniem cementów niskoemisyjnych w budownictwie

Istotnym czynnikiem środowiskowym, w aktualnych uwarunkowaniach ekologicznych i ekonomicznych, jest ograniczenie emisji CO₂ w procesie produkcji cementu, a co za tym idzie ograniczenie śladu węglowego także w produkcji betonu. Problematykę tą omówiono w punkcie 3.1 niniejszej rozprawy. Szersze stosowanie w budownictwie cementów niskoemisyjnych jest jednym z najbardziej efektywnych kierunków ograniczenia śladu węglowego w produkcji betonu zmierzającego, w przeszłości, do pełnej neutralności klimatycznej.

Ważnym problemem, z punktu widzenia wymagań ekologicznych oraz zdrowia organizmów żywych jest promieniotwórczość materiałów budowlanych oraz surowców stosowanych do ich produkcji, zwłaszcza kiedy stosujemy uboczne produkty przemysłowe po obróbce termicznej. Wytyczne związane z dopuszczalnym poziomem promieniotwórczości materiałów budowlanych określono w Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 7 stycznia 2021 Poz. 33 [117]. Do oceny możliwości stosowania materiałów budowlanych stosuje się wskaźnik I, (wskaźnik stężenia promieniotwórczego izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-232) obliczany wg wzoru [117]:

$$I = \frac{C_{K-40}}{3000Bq / kg} + \frac{C_{Ra-226}}{300Bq / kg} + \frac{C_{Th-232}}{200Bq / kg}$$

gdzie:

C_{K-40} , C_{Ra-226} i C_{Th-232} - oznaczają odpowiednio stężenia promieniotwórczego izotopów potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-232, wyrażone w bekerelach na kilogram (Bq/kg).

Wartość wskaźnika promieniotwórczości I nie może przekraczać wartości I=1,0 (całkowita niepewność wyznaczenia wartości wskaźnika przy poziomie ufności 0,95 nie może przekraczać 20% jego wartości, jeżeli jest ona nie mniejsza niż 0,8).

Stosowane w budownictwie uboczne produkty przemysłu energetycznego (popiół lotny) oraz przemysłu hutniczego (graulowany żużel wielkopiecowy) również powinny charakteryzować się odpowiednio niskim poziomem promieniotwórczości. Z uwagi na fakt, iż popioły lotne oraz żużle wielkopiecowe charakteryzują się podwyższonym poziomem promieniotwórczości [32,44],

ich stosowanie do produkcji cementu i betonu wymaga ciągłych badań zawartości promieniotwórczych izotopów potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-232.

3.4. Podsumowanie części literaturowej

Zakres stosowania cementów wieloskładnikowych, głównie cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A i cementów hutniczych CEM III/A, w ostatnich latach znacznie wzrósł. Są one wykorzystywane do produkcji betonów zwykłych, a także, dzięki ich korzystnym właściwościom, do betonów wysokowytrzymałościowych BWW oraz samozagęszczalnych SCC. Dotychczasowe zmiany w wymaganiach formalno-prawnych związanych ze wznoszeniem obiektów infrastruktury drogowo-mostowej, także spowodowały wzrost ich wykorzystania w tym obszarze budownictwa. Jednak dążenie do neutralności klimatycznej przemysłu cementowego sprawia, że powszechne stosowanie cementów niskoemisyjnych w przyszłości staje się koniecznością. Wymaga to szerszych badań z uwzględnieniem możliwości dostępu do bazy surowcowej. Wydaje się, iż w warunkach krajowego przemysłu cementowego będzie to szersze stosowanie wapienia jako składnika głównego cementu. Brak jest także szerszych doświadczeń inżynierskich z betonami wykonanymi przy użyciu nowych rodzajów cementów wieloskładnikowych zgodnych z nową normą PN-EN 197-5 [100], co skłoniło autora do nakreślenia i realizacji planu badań własnych. Obserwując trendy branży budowlanej, autor skupił swoją uwagę na pokazaniu możliwości szerszego zastosowania cementów niskoemisyjnych w budownictwie, przy jednoczesnej próbie poprawy efektywności wykorzystania cementów niskoemisyjnych poprzez odpowiednie kształtowanie składu betonu. Uwagę skupiono na użyciu cementów niskoemisyjnych w składzie betonu w klasie ekspozycji XC (karbonatyzacja) i XF (beton mrozoodporny). Są to najczęściej spotykane w budownictwie oddziaływania środowiskowe. Rozwój technologii betonu wysokowytrzymałościowego BWW oraz samozagęszczalnego SCC był zachętą i inspiracją do pokazania warunków ich wytwarzania z udziałem szerszego asortymentu cementów niskoemisyjnych.

Przy interpretacji wyników badań zwrócono uwagę nie tylko na właściwości użytkowe, ale także uwzględniono aspekty ekologiczne, tj, radioaktywność oraz poziom emisji CO₂ zastosowanych cementów oraz ślad węglowy badanych betonów.

4. BADANIA WŁASNE

Badania własne ukierunkowano na szersze poznanie właściwości mieszanki betonowej oraz stwardniałego betonu wykonanych z użyciem cementów niskoemisyjnych. Uwagę skupiono na praktycznych aspektach związanych z możliwością zastosowania cementów niskoemisyjnych w betonach zwykłych, w betonie przeznaczonym do produkcji elementów prefabrykowanych, betonach masywnych oraz betonach mrozoodpornych (szersza aplikacja w betonie nawierzchniowym oraz w obiektach inżynierii komunikacyjnej), a także w betonie wysokowytrzymałościowym BWW oraz samozagęszczalnym SCC.

4.1. Składniki badanych cementów

4.1.1. Popiół lotny krzemionkowy

Jako składnik główny cementów stosowanych w badaniach użyto popiołu lotnego krzemionkowego. Skład chemiczny popiołu lotnego krzemionkowego przedstawiono w tabeli 19. Stosowany popiół spełniał wymagania zawarte w normie PN-EN 197-1:2012 [118] (tabela 20). Stosowany popiół lotny krzemionkowy charakteryzował się niską zawartością niespalonego węgla (strata prażenia 4,43 [% mas.] - kategoria A wg normy PN-EN 450-1:2012 [108]).

Tabela 19. Skład chemiczny popiołu lotnego krzemionkowego wg PN-EN 196-2 [119]

Zawartość składnika [% mas.]									
CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl-	Na ₂ O	K ₂ O	Strata prażenia [%]
2,6	5,5	51,6	27,2	2,3	0,1	0,0	0,9	3,2	4,4

Tabela 20. Właściwości popiołu lotnego krzemionkowego, a wymagania normy PN-EN 197-1:2012 [118]

Właściwość	Wynik badania	Wymagania wg PN-EN 197-1:2012			Metoda badań
Strata prażenia [% mas.]	4,4	0-5	2-7	4-9	PN-EN 196-2:2013 [119]
Zawartość reaktywnego CaO [% mas.]	2,4	≤ 10			PN-EN 196-2:2013 [119]
Zawartość wolnego CaO [% mas.]	0,05	≤ 2,5%			PN-EN 451-1:2017 [120]
Zawartość reaktywnego SiO ₂ [% mas.]	35,6	≥ 25%			PN-EN 196-2:2013 [119]
Gęstość [g/cm ³]	2,20	Brak wymagań			PN- EN 1097-7:2008 [121]
Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	3785	Brak wymagań			PN-EN 196-6:2019 [122]

4.1.2. Zmielony granulowany żużel wielkopieczowy

W tabeli 21 przedstawiono skład chemiczny stosowanego w badaniach zmielonego granulowanego żużla wielkopieczowego, natomiast w tabeli 22 przedstawiono jego właściwości fizykochemiczne wraz z kryteriami przyjętymi w normie PN-EN 197-1 [118]. Wyniki badań zastosowanego żużla w pełni spełniają wymagania normy PN-EN 197-1 [118].

Tabela 21. Skład chemiczny granulowanego żużla wielkopieczowego

Zawartość składnika [% mas.]									
CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl-	Na ₂ O	K ₂ O	Strata prażenia
43,85	0,88	38,58	7,11	6,4	1,31	0,011	0,44	0,32	0,7

Tabela 22. Właściwości zmielonego granulowanego żużla wielkopieczowego, a wymagania normy PN-EN 197-1:2012 [118]

Właściwość	Wynik badania	Wymagania wg PN-EN 197-1:2012 [118]	Metoda badań
Zawartość sumy tlenków CaO + MgO + SiO ₂ [% mas.]	88,83	≥ 67	PN-EN 196-2:2013 [119]
Zawartość fazy amorficznej [% mas.]	98,4	≥ 67	PN-B-19707:2013 [112]
Stosunek masy (CaO + MgO)/SiO ₂	1,30	≥ 1,0	PN-EN 197-1 [118]
Gęstość [g/cm ³]	2,91	Brak wymagań	PN-EN 1097-7:2008 [121]
Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	3785	Brak wymagań	PN-EN 196-6:2019 [122]

4.1.3. Wapień

W badaniach stosowano wapień kategorii LL (zawartość węgla organicznego < 0,20 % masy) wg normy PN-EN 197-1 [118], którego skład chemiczny przedstawiono w tabeli 23. Wapień spełnia wymagania normy PN-EN 197-1 [118], zestawienie właściwości wapienia wraz z wymaganiami przedstawiono w tabeli 24.

Tabela 23. Skład chemiczny wapienia (LL) wg PN-EN 196-2:2013 [119]

Zawartość składnika [% mas.]									
CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl-	Na ₂ O	K ₂ O	Strata prażenia
53,1	0,2	2,8	0,45	0,36	0,1	0,020	0,01	0,03	42,2

Tabela 24. Właściwości wapienia oraz wymagania normy PN-EN 197-1:2012 [118]

Właściwość	Wynik badania	Wymagania wg PN-EN 197-1:2012 [118]		Metoda badań
Zawartość węgla wapnia CaCO ₃ [% mas.]	94,8	≥ 75		PN-EN 197-1 [118]*
Zawartość gliny [g/g]	0,4/100	≤ 1,2/100		PN-EN 933-9:2013 [123]
Całkowita zawartość węgla organicznego TOC [% mas.]	0,07	≤ 0,20 LL	≤ 0,50 LL	PN-EN 13639:2017 [124]
Gęstość [g/cm ³]	2,75	Brak wymagań		PN- EN 1097-7:2008 [121]
Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	4910**	Brak wymagań		PN-EN 196-6:2019 [122]

*Zawartość węgla wapnia CaCO₃ obliczono z zawartości CaO oznaczonej wg PN-EN 196-2 [119]

** Powierzchnia właściwa odnosi się do wapienia stosowanego w cementach przygotowanych w warunkach laboratoryjnych, w cementach pochodzących z próby przemysłowej wapień był współmielony z klinkierem portlandzkim

4.1.4. Nośniki klinkieru portlandzkiego

W prowadzonych badaniach, jako nośnik klinkieru portlandzkiego z regulatorem czasu wiązania, stosowano dwa cementy – cement CEM I 52,5 R w przypadku cementów przygotowywanych w skali laboratoryjnej oraz półprodukt oznaczony jako CEM B (w przypadku produkcji cementów wykonywanych w skali przemysłowej). W tabeli 25 przedstawiono skład chemiczny stosowanych nośników klinkieru, a w tabeli 26 skład mineralny cementu (główne składniki mineralne klinkieru portlandzkiego).

Tabela 25. Skład chemiczny stosowanych nośników klinkieru portlandzkiego PN-EN 196-2:2013 [119]

Nośnik	Zawartość składnika [% mas.]									
	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl-	Na ₂ O	K ₂ O	Strata prażenia
CEM I 52,5R	64,99	2,72	20,65	5,47	1,66	2,25	0,06	0,12	0,68	1,96
Półprodukt CEM B*	62,68	2,47	19,7	5,25	1,44	3,79	0,097	0,121	0,81	1,15

*klinkier portlandzki z regulatorem czasu wiązania

Tabela 26. Skład mineralny stosowanych nośników klinkieru portlandzkiego

Rodzaj fazy mineralnej	Zawartość fazy mineralnej [% mas.]	
	CEM I 52,5 R	Póprodukt CEM B
Krzemian trójwapniowy C ₃ S - alit	64,4	62,5
Krzemian dwuwapniowy C ₂ S – belit	9,5	10,3
Glinian trójwapniowy C ₃ A	10,1	9,3
Glinożelazian czterowapniowy – C ₄ AF	8,8	8,1

Oznaczenie składu mineralnego stosowanych cementów wykonano przy użyciu dyfraktometrii rentgenowskiej (XRD). W tabeli 27 przedstawiono właściwości stosowanych w badaniach nośników klinkieru portlandzkiego (cementy) wraz z wymaganiami normy PN-EN 197-1:2012 [118]. Zarówno półprodukt CEM B, jak i cement portlandzki CEM I 52,5 R spełniają wymagania normy PN-EN 197-1: 2012 [118].

Tabela 27. Właściwości nośników klinkieru w odniesieniu do wymagań normy PN-EN 197-1:2012 [118]

Właściwość	półprodukt CEM B	CEM I 52,5 R	Wymaganie wg PN-EN 197-1: 2012 [118]	Metoda badań	
Strata prażenia [% mas.]	1,15	2,77	≤ 5,0	PN-EN 196-2:2013 [119]	
Pozostałość nierozpuszczalna [% mas.]	0,27	0,62	≤ 5,0		
Zawartość siarczanów SO ₃ [% mas.]	3,79	2,81	≤ 4,0		
Zawartość chlorków Cl ⁻ [% mas.]	0,097	0,060	≤ 0,10		
Zawartość alkaliów Na ₂ Oeq [% mas.]	0,65	0,69	Brak wymagań		
Gęstość [g/cm ³]	3,13	3,07	Brak wymagań	PN- EN 1097-7:2008 [121]	
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a [cm ² /g]	4104	5270	Brak wymagań	PN-EN 196-6:2019 [122]	
Właściwa ilość wody do konsystencji normowej [% mas.]	31,0	33,0	Brak wymagań	PN-EN 196-3:2016 [125]	
Początek czasu wiązania [minuty]	145	167	≥ 45*		
Stałość objętości [mm]	-	0,3	≤ 10		
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	2 dni	39,1	39,6	≥ 30,0*	PN-EN 196-1:2016 [126]
	7 dni	53,9	57,5	Brak wymagań	
	28 dni	65,2	67,9	≥ 52,5*	
	90 dni	67,0	70,6	Brak wymagań	

* – dotyczy cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R

4.2. Składniki badanych betonów

W badaniach skupiono uwagę na aplikacjach cementów niskoemisyjnych w betonie. Dlatego też, poza badaniami składników cementów niskoemisyjnych, zaprojektowano i wykonano szereg mieszanek betonowych. Badania prowadzono zarówno na mieszance betonowej jak i na betonie stwardniałym.

4.2.1. Cement z prób przemysłowych

W badaniach o pełnym zakresie badań stosowano cementy pochodzące z próby przemysłowej: cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M(S-LL) oraz CEM II/C-M(S-V), cement wieloskładnikowy CEM VI (S-V). Jako cementy referencyjne stosowano cementy portlandzki CEM I 52,5 R oraz cement hutniczy CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA (cementy produkowane w skali przemysłowej). Skład stosowanych cementów (zawartość składników głównych) przedstawiono w tabeli 28.

Tabela 28. Zawartość składników głównych w badanych cementach

Cement	Składniki główne [% mas.]			
	klinkier	żużel wielkopieczowy	popiół lotny krzemionkowy	wapień
	K*	S	V	LL
CEM I 52,5 R	100	-	-	-
CEM I 42,5 R	100	-	-	-
CEM II/C-M(S-LL)	60	30	-	10
CEM II/C-M(S-V)	53	32	15	-
CEM VI (S-V)	47	43	10	-
CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	50	50	-	-

*klinkier portlandzki wraz z regulatorem czasu wiązania

Dla stosowanych w badaniach cementów wykonano analizę chemiczną wg PN-EN 196-2 [119]. Wyniki przedstawiono w tabeli 29.

Tabela 29. Skład chemiczny badanych cementów

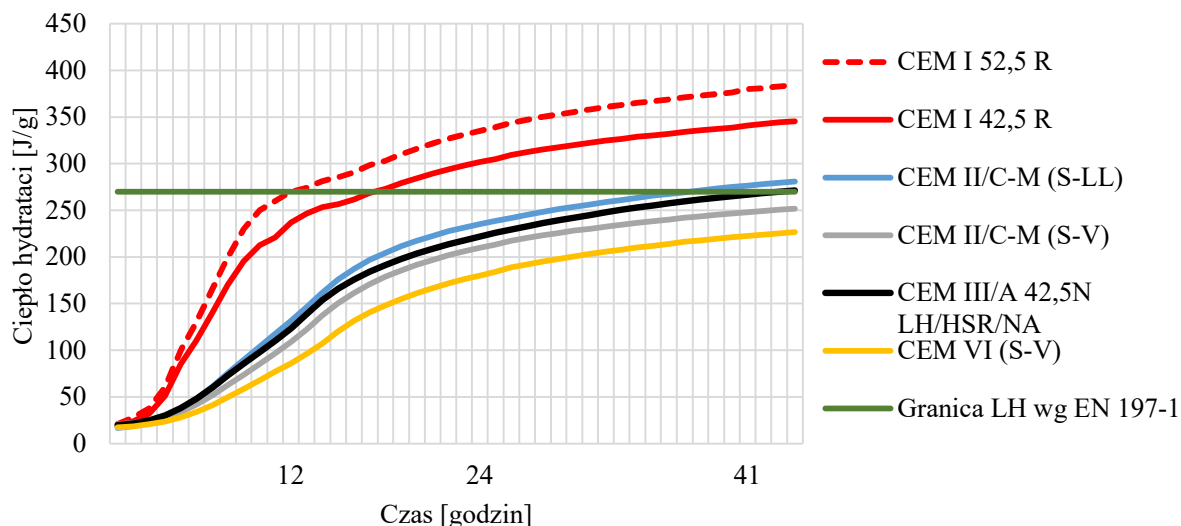
Cement	Udział składnika [% wag.]									
	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Na ₂ O	K ₂ O	Strata prażenia
CEM I 52,5 R	64,99	2,72	20,65	5,47	1,66	2,25	0,06	0,12	0,68	1,95
CEM I 42,5 R	64,20	2,81	20,91	4,60	1,31	2,82	0,05	0,20	0,81	1,82
CEM II/C-M (S-LL)	56,90	1,82	24,66	5,47	2,84	2,91	0,030	0,19	0,55	1,15
CEM II/C-M(S-V)	48,30	2,83	30,37	8,89	2,93	2,14	0,051	0,33	1,05	1,33
CEM VI (S-V)	48,16	2,34	31,01	8,26	3,51	1,84	0,044	0,32	0,89	1,05
CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	52,75	2,21	30,54	6,16	4,17	2,08	0,068	0,32	0,63	1,22

Wykonano również badania podstawowych właściwości fizycznych oraz mechanicznych cementów. Zakres wykonanych badań obejmował: gęstość właściwą, wodozadność, początek czasu wiązania wg PN-EN 193-3 [125], powierzchnię właściwą wg PN-EN 196-6 [122] oraz wytrzymałość na ściskanie zgodnie z PN-EN 196-1 [126]. Wyniki przedstawiono w tabeli 30.

Tabela 30. Właściwości fizyczne i mechaniczne badanych cementów

Cement	Gęstość [g/cm ³]	Wodozadność [% mas.cem.]	Początek czasu wiązania [minuty]	Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	Wytrzymałość na ściskanie po upływie, [MPa]				
					2 dni	7 dni	28 dni	56 dni	90 dni
CEM I 52,5 R	3,07	33,0	164	5270	39,6	57,5	67,9	69,2	70,6
CEM I 42,5 R	3,07	25,9	176	3860	27,2	45,9	56,7	60,1	61,3
CEM II/C-M(S-LL)	3,06	27,6	200	4380	18,5	34,4	53,3	59,6	63,2
CEM II/C-M(S-V)	2,88	27,8	215	3648	16,3	31,1	54,5	64,8	71,1
CEM VI (S-V)	2,90	27,8	240	3769	13,2	27,1	56,4	64,0	70,7
CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	3,02	32,5	225	3940	15,3	29,7	56,3	62,1	66,6

Wszystkie badane cementy można zakwalifikować do klasy wytrzymałości 42,5 N z wyjątkiem cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R, dla którego wyniki badań potwierdziły klasę wytrzymałości na ściskanie 52,5 R. Ciepło hydratacji cementów oznaczono metodą semiadiabatyczną zgodnie z normą PN -EN 196-9:2010 [90]. Wyniki przedstawiono na rysunku 26 oraz w tabeli 31.



Rys. 26. Ciepło hydratacji cementów

Tabela 31. Ciepło hydratacji cementów

Czas [godziny]	Ciepło hydratacji [J/g]					
	CEM I 52,5 R	CEM I 42,5 R	CEM II/C-M (S-LL)	CEM II/C-M (S-V)	CEM III/A 42,5 N LH/HSR/NA	CEM VI (S-V)
12	269,8	237,1	131,7	109,0	123,5	86,1
24	335,0	302,4	235,3	209,8	222,1	209,8
36	369,0	333,2	267,1	240,1	257,6	214,0
41	380,0	341,0	276,0	248,2	266,1	222,5

Wyniki badania ciepła hydratacji cementów pozwalają zaklasyfikować cementy: CEM II/C-M(S-V), CEM VI (S-V), a także cement CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA jako cementy o niskim cieple hydratacji LH. Ciepło hydratacji cementu CEM II/C-M(S-LL) po 41 godzinach wyniosło 279,6 [J/g] i nieznacznie przekroczyło poziom dla cementów LH (<270 J/g).

4.2.2 Kruszywo

W składzie mieszanek betonowych jako kruszywa stosowano:

- kruszywo drobne (piasek) frakcji 0/2 mm;
- kruszywo grube żwirowe frakcji 2/8 mm, 8/16 mm oraz 16/31,5 mm;
- kruszywo grube łamane - bazaltowe frakcji 2/8 mm oraz 8/16 mm.

Wszystkie kruszywa spełniały wymagania normy PN-EN 12620+A1:2010 [127].

Skład ziarnowy stosowanych kruszyw określono zgodnie z procedurą zawartą w normie PN-EN 933-1:2012 [128]. Zastosowano metodę przesiewania na mokro.

4.2.2.1. Kruszywo drobne

W tabeli 32 przedstawiono skład ziarnowy piasku 0/2 mm. Zawartość frakcji ziarnowej 0/2 mm wynosiła 98,2%, gęstość piasku wynosiła 2,65 kg/dm³, natomiast nasiąkliwość 0,55% masy.

Tabela 32. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego kruszywa drobnego - piasek 0/2 mm

Oznaczenie kruszywa	Zawartość frakcji przechodzących przez sito [% mas.]							
	0,00 mm	0,063mm	0,125 mm	0,250 mm	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm	4,0 mm
Piasek 0/2 mm	0,0	0,8	2,6	19,4	59,8	84,8	98,2	100,0

4.2.2.2. Kruszywo grube żwirowe

Skład ziarnowy zastosowanego żwiru przedstawiono w tabeli 33. Punkt piaskowy żwiru 2/8 mm wynosił 4,6% mas., natomiast żwiru 8/16 mm był równy 0,9% mas.. Gęstość żwiru wynosiła 2,62 kg/dm³. Mrozoodporność kruszywa spełnia wymagania kategorii F₁ według PN-EN 12620+A1:2010 [127], co z punktu widzenia wymogów stawianych przez normę PN-EN 206 [95] umożliwia zastosowanie tego kruszywa w betonach przewidzianych do zastosowania w warunkach środowiskowych określonych w klasach ekspozycji XF1÷XF3. Wyniki badań

mrozoodporności w soli F_{NaCl} 5 dopuszczają zastosowanie kruszywa w klasie ekspozycji XF4. Pozostałe właściwości stosowanego żwiru podano w tabeli 34.

Tabela 33. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego kruszywa grubego – żwir 2/8 mm oraz żwir 8/16 mm

Oznaczenie kruszywa	Zawartość frakcji przechodzących przez sito [% mas.]										
	0,0 mm	0,063mm	0,125 mm	0,250 mm	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm	4,0 mm	8,0 mm	16,0 mm	31,5 mm
Żwir 2/8 mm	0,0	0,6	0,8	1,3	1,6	1,9	4,6	42,1	97,1	100,0	100,0
Żwir 8/16 mm	0,0	0,0	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	1,4	4,5	95,4	100,0
Żwir 16/31,5 mm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	4,0	100,0

Tabela 34. Właściwości kruszywa grubego żwirowego frakcji 2/8 mm, 8/16 mm oraz 16/31,5mm

Rodzaj badania	Metoda badania	Wynik badania	
		Żwir 2/8 mm	Żwir 8/16 mm oraz 16/31,5 mm
Uziarnienie	PN-EN 12620+A1:2010 [127]	G _C 85/20	G _C 85/20
Zawartość pyłów		f ₃	f ₃
Odporność na ścieranie	PN-EN 1097-1:2011 [129]	M _{DE} 20	M _{DE} 20
Odporność na ścieranie powierzchniowe	PN-EN 1097-8:2020-09 [130]	AAV ₁₀	AAV ₁₀
Oznaczenie kształtu ziaren za pomocą wskaźnika płaskości	PN-EN 933-3:2012 [131]	Fl ₁₅	Fl ₁₅
Oznaczenie kształtu ziaren za pomocą wskaźnika kształtu	PN-EN 933-4:2008 [132]	Sl ₁₅	Sl ₁₅
Oznaczenie gęstości ziaren i nasiąkliwości	PN-EN 1097-6:2013-11 [133]	ρ _a = 2,62 kg/dm ³ WA ₂₄₂	ρ _a = 2,62 kg/dm ³ WA ₂₄₁
Oznaczenie odporności na rozdrobnienie metodą Los Angeles	PN-EN 1097-2:2010 [134]	LA ₃₅	LA ₃₅
Potencjalna reaktywność	PN-B-06714-46:1992 [135]	Stopień 0	Stopień 0
Oznaczenie mrozoodporności	PN-EN 1367-1:2007 [136]	F ₁	F ₁
Mrozoodporność w soli	PN-EN 1367-6:2008 [137]	F _{NaCl} 5	F _{NaCl} 5

4.2.2.3. Kruszywo grube łamane

W tabeli 35 podano skład ziarnowy zastosowanego kruszywa bazaltowego. Gęstość kruszywa bazaltowego wynosiła 3,09 kg/dm³. Pozostałe właściwości stosowanego kruszywa bazaltowego podano w tabeli 36.

Tabela 35. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego kruszywa grubego łamanego – bazalt faksji 2/8 mm oraz 8/16 mm

Oznaczenie kruszywa	Zawartość frakcji przechodzących przez sito [% mas.]										
	0,00 mm	0,063mm	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
Bazalt 2/8 mm	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	1,3	42,1	97,0	100,0	100,0
Bazalt 8/16 mm	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,6	0,6	0,9	4,2	96,4	100,0

Tabela 36. Właściwości kruszywa bazaltowego faksji 2/8 mm oraz 8/16 mm

Rodzaj badania	Metoda badania	Wynik badania	
		Bazalt 2/8 mm	Bazalt 8/16 mm
Uziarnienie	PN-EN 12620+A1:2010 [127]	G _C 85/20	G _C 85/20
Zawartość pyłów		f _{1,5}	f _{1,5}
Odporność na ścieranie	PN-EN 1097-1:2011 [129]	M _{DE} 15	M _{DE} 20
Odporność na ścieranie powierzchniowe	PN-EN 1097-8:2020-09 [130]	AAV ₁₀	AAV ₁₀
Oznaczenie kształtu ziaren za pomocą wskaźnika płaskości	PN-EN 933-3:2012 [131]	Fl ₂₀	Fl ₁₅
Oznaczenie kształtu ziaren za pomocą wskaźnika kształtu	PN-EN 933-4:2008 [132]	Sl ₁₅	Sl ₁₅
Oznaczenie gęstości ziaren i nasiąkliwości	PN-EN 1097-6:2013-11 [133]	ρ _a = 3,09 kg/dm ³ WA ₂₄₁	ρ _a = 3,09 kg/dm ³ WA ₂₄₁
Oznaczenie odporności na rozdrobnienie metodą Los Angeles	PN-EN 1097-2:2010 [134]	LA ₃₅	LA ₃₅
Potencjalna reaktywność alkaliczna	PN-B-06714-46:1992 [135]	Stopień 0	Stopień 0
Oznaczenie mrozoodporności	PN-EN 1367-1:2007 [136]	F ₁	F ₁
Mrozoodporność w soli	PN-EN [136]:2008	F _{NaCl} 5	F _{NaCl} 5

Podobnie, jak w przypadku stosowanych kruszyw żwirowych, kruszywo bazaltowe może być stosowane w betonie narażonym na oddziaływanie środowiska określonego w klasach

ekspozycji od XF1 do XF4. Kruszywo bazaltowe spełnia także wymagania zawarte w OST [116], co świadczy o jego przydatności do zastosowania w inżynierii komunikacyjnej.

4.2.3. Popiół lotny

Skład chemiczny stosowanego, w charakterze dodatku typu II, popiołu lotnego przedstawiono w tabeli 37, natomiast właściwości w odniesieniu do wymagań normy PN-EN 450-1:2012 [108] w tabeli 38. Popiół charakteryzował się wysokim wskaźnikiem aktywności po 28 dniach dojrzewania - 80,3% i po 90 dniach dojrzewania - 88,7% oraz niską stratą prażenia 1,89% i miałkością dla kategorii N. Właściwości stosowanego popiołu lotnego świadczą o spełnieniu wymagań normy PN-EN 450-1:2012 [108].

Tabela 37. Skład chemiczny zastosowanego popiołu lotnego krzemionkowego

Zawartość składnika [% mas.]									
Strata prażenia	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻
1,89	51,22	29,06	6,62	3,67	2,53	0,47	1,42	3,47	0,012

Tabela 38. Właściwości popiołu lotnego w kontekście wymagań normy PN-EN 450-1 [108]

Właściwość	Wymaganie wg PN-EN 450-1:2012 [108]	Uzyskany wynik
Strata prażenia [% mas.]	≤ 5,0 (kategoria A)	1,89
Miałkość, pozostałość na sicie 45 μm [% mas.]	≤ 40 (kategoria N) ≤ 12 (kategoria S)	34,9
Zawartość chlorków Cl ⁻ [% mas.]	≤ 0,1	0,012
Zawartość siarczanów SO ₃ [% mas.]	≤ 3,0	0,47
Zawartość reaktywnego CaO [% mas.]	≤ 10,0	3,67
Zawartość reaktywnego SiO ₂ [%mas.]	≥ 25	51,22
∑ (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃), [%mas.]	≥ 70	86,90
Zawartość Na ₂ O _{eq} [%]	≤ 5,0	1,42
Zawartość MgO [% mas.]	≤ 4,0	2,53
Wskaźnik aktywności 28 dni [%]	≥ 75	80,3
Wskaźnik aktywności 90 dni [%]	≥ 85	88,7
Gęstość [g/cm ³]	---	2,23
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a [cm ² /g]	---	3640
Wodoządnosc [% mas.]	≤ 95 wyłącznie dla kategorii S	94,7

4.2.4. Pył krzemionkowy

Właściwości pyłu krzemionkowego, stosowanego w charakterze dodatku typu II, wraz z wymaganiami normy PN-EN 13263-1+A1:2010 [85] przedstawiono w tabeli 39. Pył krzemionkowy charakteryzował się niskimi stratami prażenia na poziomie 1,54 % masy. Wysoka zawartość SiO₂ wynosząca 93,5 % masy pozwoliła zakwalifikować pył krzemionkowy do kategorii 1. Użyty w badaniach pył krzemionkowy spełniał wymagania normy PN-EN 13263-1+A1:2010 [85].

Tabela 39. Właściwości pyłu krzemionkowego w kontekście wymagań normy PN-EN 13263-1+A1:2010 [109]

Właściwość	Wymaganie wg PN-EN 13263-1+A1:2010 [85]	Uzyskany wynik
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a [m ² /g]	15÷35	25,8
Strata prażenia [% mas.]	≤ 4,0	1,54
Zawartość SiO ₂ [% mas.] <ul style="list-style-type: none">• kategoria 1• kategoria 2	≥ 85,0 ≥ 80,0	93,5
Zawartość Cl- [% mas.]	≤ 0,3	0,013
Zawartość SO ₃ [% mas.]	≤ 2,0	0,21
Zawartość wolnego CaO [% mas.]	≤ 1,0	0,53
Zawartość wolnego Si [% mas.]	≤ 0,4	0,1
Wskaźnik aktywności po 28 dniach [%] (90% CEM I 42,5R i 10% pyłu)	≥ 100,0	119

4.2.5. Domieszki

W procesie badawczym zastosowano następujące domieszki:

- superplastyfikator o nazwie handlowej MasterGlenium Sky 591,
- superplastyfikator o nazwie handlowej MasterGlenium Sky 686,
- superplastyfikator o nazwie handlowej MasterEase 3040,
- plastyfikator o nazwie handlowej MasterPozzilith 18 BVC,
- domieszkę napowietrzającą o nazwie handlowej MasterAir 3012,
- domieszkę przyspieszającą twardnienie o nazwie handlowej MasterX-SEED 100,
- domieszkę opóźniającą wiązanie o nazwie handlowej MasterSet R 433.

Właściwości zastosowanych domieszek zostały przedstawione w tabeli 40.

Tabela 40. Właściwości fizykochemiczne domieszek

Domieszka	Składnik podstawowy	Gęstość (w temp. 20°C) [g/cm ³]	Odczyn pH (w temp. 20°C)	Zawartość chlorków [% mas.]	Zawartość alkaliów [% mas.]	Zawartość części Stałych [% mas.]
MasterGlenium Sky 591	Eter polikarboksylowy	1,07±0,02	6,5 ± 1,0	≤ 0,1	≤ 1,5	30,8
MasterGlenium Sky 686	Eter polikarboksylowy	1,05±0,02	6,0 ± 1,0		≤ 2,0	22,3
MasterEase 3040	Dyspersja poliakrylanów	1,08±0,02	5,5 ± 1,0		≤ 2,0	33,4
MasterPozolith 18 BVC	Lignosulfoniany	1,10±0,02	5,2 ± 1,0		≤ 3,0	34,2
MasterAir 3012	Zmydlona żywica płynna terpentynowa	1,00±0,02	12,5 ± 1,0		≤ 0,5	22,4
MasterX-SEED 100	Faza C-S-H	1,35 ± 0,2	11,5 ± 2,0		≤ 4,0	20,0
MasterSet R 433	Sacharoza	1,04±0,02	8,0 ± 1,5		≤ 0,3	22,6

Zastosowane w badaniach domieszki spełniały wymagania normy PN-EN 934-1:2009 [138].

4.2.5 Woda

Zastosowano wodę wodociągową, która z definicji spełnia wymagania normy PN-EN 1008:2004 [139].

4.3. Właściwości cementów niskoemisyjnych

Część badawczą dotyczącą właściwości cementów niskoemisyjnych przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie określono właściwości cementów przygotowanych w warunkach laboratoryjnych. Przeprowadzone badania miały na celu ocenę wpływu poszczególnych składników głównych w składzie cementu wieloskładnikowego na właściwości fizykomechaniczne. Uwagę skupiono na cementach żuźlowych, popiołowych, wapiennych, a także żuźlowo-wapiennych oraz popiołowo-wapiennych.

Szczególne uwagę zwrócono na wpływ wielkości stosunku w/c na kształtowanie się właściwości mechanicznych użytych w badaniach cementów, jako podstawowy czynnik technologiczny kształtujący właściwości (zwłaszcza trwałościowe) współczesnego betonu. W drugim etapie badań dokonano analizy właściwości cementów wyprodukowanych w warunkach przemysłowych. Zbadano wpływ stosunku w/c oraz temperatury dojrzewania na właściwości mechaniczne cementów.

Zakres wykonanych badań obejmował oznaczenie:

- ilości wody do konsystencji normowej, początku czasu wiązania, stałości objętości wg PN-EN 196-3 [125];
- powierzchni właściwej wg PN-EN 196-6 [122]

- wytrzymałości na ściskanie normowych zapraw cementowych wg PN-EN 196-1 [126] po 2, 7, 28, 56 i 90 dniach dojrzewania
- wpływu stosunku w/c na przyrost wytrzymałości na ściskanie normowej zaprawy cementowej (wg PN-EN 196-1 [126]), po 2, 7, 14, 28, 56 i 90 dniach dojrzewania,
- wpływu temperatury dojrzewania na wytrzymałość na ściskanie normowej zaprawy cementowej (wg PN-EN 196-1 [126]), po 2, 7, 28, 56 i 90 dniach dojrzewania.

4.3.1. Właściwości cementów przygotowanych w warunkach laboratoryjnych

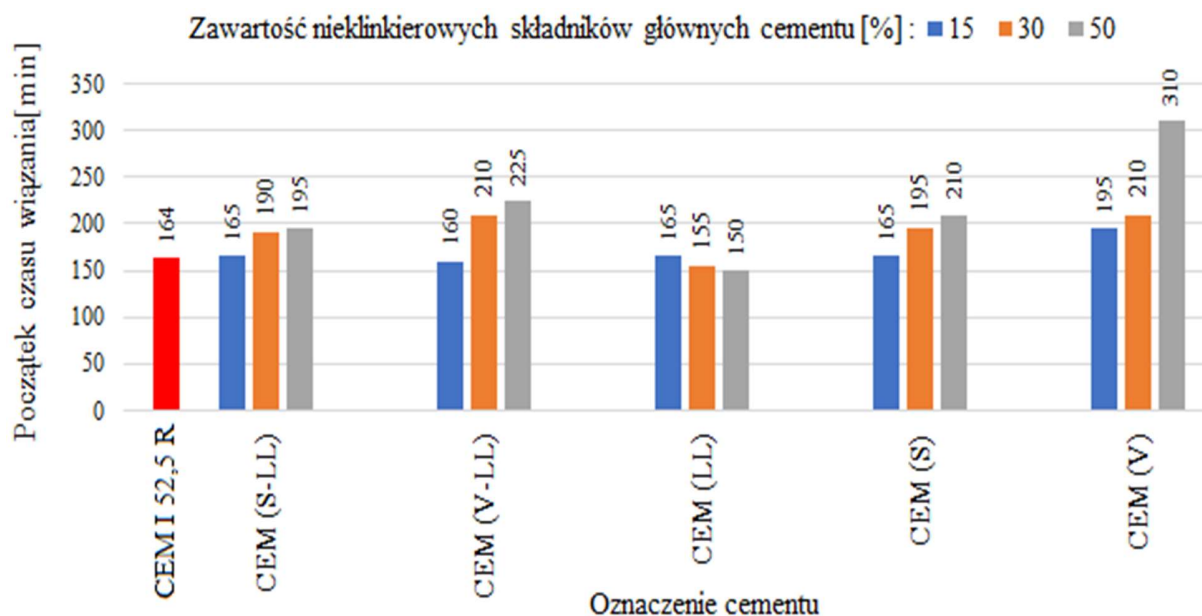
Przygotowano 15 cementów o różnym udziale składników głównych, jako cementu referencyjnego użyto cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R. Składy oraz przyjęte oznaczenia cementów przedstawiono w tabeli 41, natomiast właściwości fizyczne cementów przedstawiono w tabeli 42.

Tabela 41. Składy oraz oznaczenia cementów przygotowanych w warunkach laboratoryjnych

Rodzaj cementu	Zawartość składnika głównego [% wag.]			
	CEM I 52,5 R	Zmielony granulowany żużel wielkopiecowy (S)	Popiół lotny krzemionkowy (V)	Mielony wapień (LL)
CEM I 52,5 R	100	-	-	-
CEM 15 (S-LL)	85	7,5	-	7,5
CEM 15 (V-LL)	85	-	7,5	7,5
CEM 15LL	85	-	-	15
CEM 15S	85	15	-	-
CEM 15V	85	-	15	-
CEM 30 (S-LL)	70	15	-	15
CEM 30 (V-LL)	70	-	15	15
CEM 30LL	70	-	-	30
CEM 30S	70	30	-	-
CEM 30V	70	-	30	-
CEM 50 (S-LL)	50	25	-	25
CEM 50 (V-LL)	50	-	25	25
CEM 50LL	50	-	-	50
CEM 50S	50	50	-	-
CEM 50V	50	-	50	-

Tabela 42. Właściwości fizyczne cementów przygotowanych w warunkach laboratoryjnych

Rodzaj cementu	Właściwość			
	Wodożądność [%]	Początek czasu wiązania [min]	Gęstość [g/cm ³]	Powierzchnia właściwa [cm ² /g]
CEM I 52,5 R	33,0	164	3,07	5270
CEM 15 (S-LL)	28,0	165	3,08	4210
CEM 15 (V-LL)	27,8	160	3,00	4110
CEM 15 LL	28,0	165	3,06	4310
CEM 15 S	28,0	165	3,08	4160
CEM 15 V	27,6	195	2,93	4030
CEM 30 (S-LL)	28,2	190	3,04	4310
CEM 30 (V-LL)	28,0	210	2,90	4260
CEM 30 LL	27,6	155	3,02	4460
CEM 30 S	27,8	195	3,05	4340
CEM 30 V	27,2	210	2,78	4000
CEM 50 (S-LL)	28,2	195	2,96	4270
CEM 50 (V-LL)	27,4	225	2,74	4060
CEM 50 LL	27,8	150	2,91	4480
CEM 50 S	28,8	210	3,00	4150
CEM 50 V	27,2	310	2,59	3560



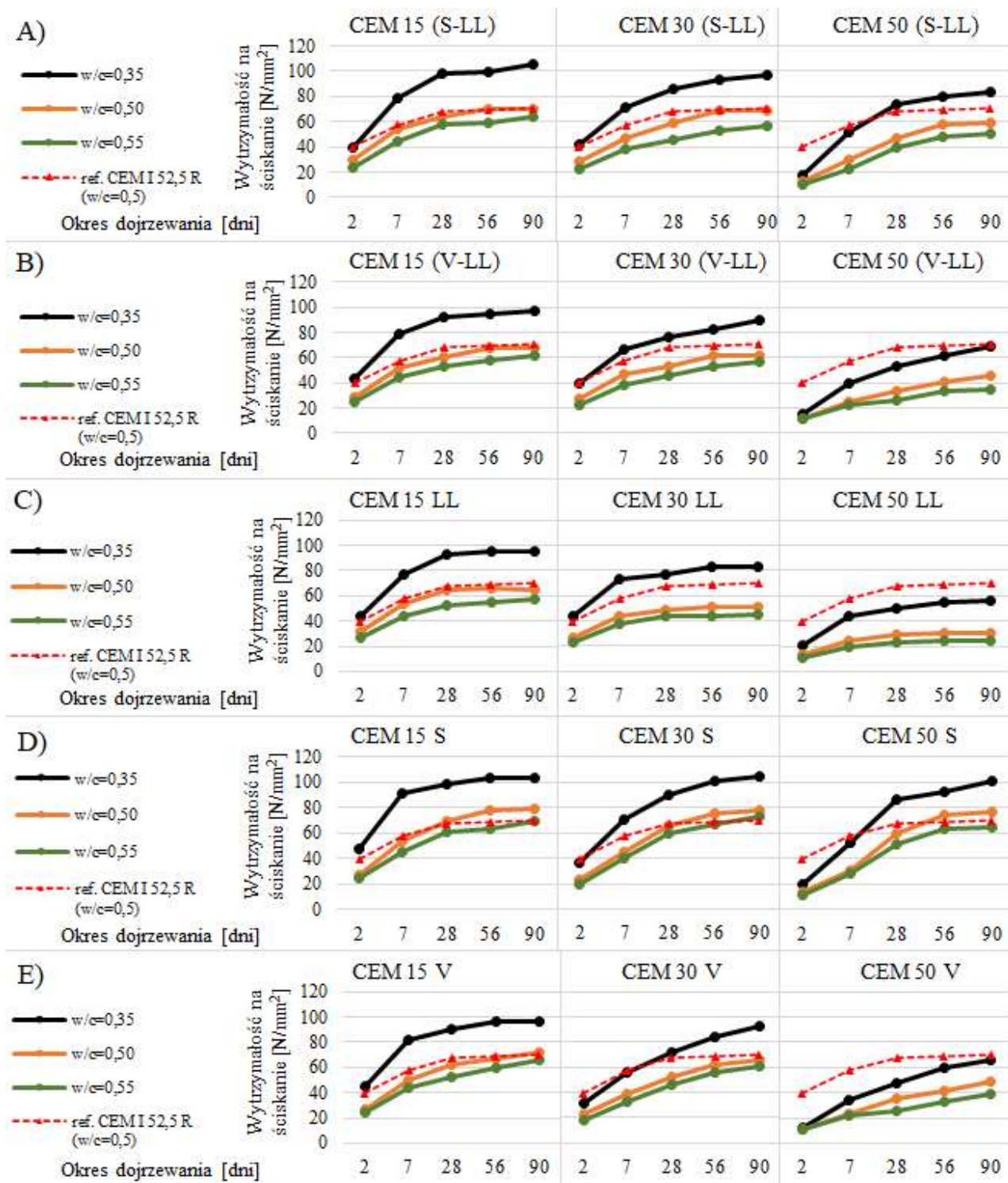
Rys. 27. Czas początku wiązania cementów przygotowanych w warunkach laboratoryjnych

Cementy charakteryzowały się zbliżoną wodożądnością. Zauważyć można niewielki spadek wodożądności w przypadku cementów zawierających popiół lotny krzemionkowy (V) (tabela 41). Wraz ze wzrostem udziału w składzie cementu zmielonego granulowanego żużla wielkopieczowego (S) oraz popiołu lotnego krzemionkowego (V) wydłużał się czas początku wiązania, natomiast wzrost udziału zmielonego wapienia skutkował skróceniem czasu początku wiązania (rys. 27). Czas początku wiązania cementów żużlowo-wapiennych oznaczonych CEM 15 (S-LL) oraz popiołowo-wapiennych oznaczonych CEM 15 (V-LL), przy zawartości nieklinkierowych składników głównych na poziomie 15%, był zbliżony do czasu wiązania cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R. Wraz ze wzrostem zawartości nieklinkierowych składników głównych do 30% oraz 50% czas początku wiązania wydłużał się. Cementy popiołowo-wapienne oznaczone CEM 30 (V-LL) i CEM 50 (V-LL) charakteryzują się dłuższym czasem początku wiązania niż cementy żużlowo-wapienne oznaczone CEM 30 (S-LL) i CEM 50 (S-LL) (rys. 27).

Określono wytrzymałość na ściskanie zaprawy normowej z przygotowanych cementów wieloskładnikowych. Zaprawy przygotowano przy $w/c=0,35$; $0,50$; $0,55$. W przypadku zapraw o obniżonym współczynniku wodno-cementowym ($w/c=0,35$) w składzie zastosowano superplastyfikator polimerowy. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie zapraw przedstawiono w tabeli 43 oraz na rysunku 28. Na podstawie wytrzymałości 2-dniowej i 28-dniowej przeprowadzono klasyfikację cementów pod kątem klasy wytrzymałości na ściskanie poprzez oznaczenie rodzaju cementu w tabeli 43 odpowiednim kolorem (zgodnie z legendą).

Tabela. 43. Wytrzymałość na ściskanie cementów wieloskładnikowych przy różnym stosunku wodno-cementowym

Rodzaj cementu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po upływie														
	2 dni			7 dni			28 dni			56 dni			90 dni		
	stosunek wodno-cementowy [-]														
	0,35	0,50	0,55	0,35	0,50	0,55	0,35	0,50	0,55	0,35	0,50	0,55	0,35	0,50	0,55
ref. CEM I 52,5 R	-	39,6	-	-	57,5	-	-	67,9	-	-	69,2	-	-	70,6	-
CEM 15 (S-LL)	39,3	29,5	24,1	78,0	54,0	44,7	97,6	64,5	58,1	99,5	70,6	59,5	105,0	70,6	63,4
CEM 15 (V-LL)	43,4	28,6	25,4	78,4	51,8	45,0	92,2	60,1	53,2	95,2	67,7	57,6	97,1	67,6	61,1
CEM 15LL	43,9	32,1	26,4	77,4	54,1	44,1	92,8	64,1	52,8	94,9	65,3	54,4	94,9	64,9	57,6
CEM 15S	47,3	27,2	24,2	91,4	53,7	44,7	99,2	69,1	60,4	103,9	78,0	62,8	103,9	79,2	69,9
CEM 15V	45,4	27,2	24,6	82,4	49,4	43,3	90,4	62,6	52,5	95,9	66,8	59,8	95,9	71,7	66,0
CEM 30 (S-LL)	42,2	27,9	22,1	70,9	46,8	38,0	85,9	59,6	45,7	92,8	69,1	53,4	97,4	68,5	57,0
CEM 30 (V-LL)	39,4	27,5	22,1	66,2	46,8	38,0	76,6	52,8	45,7	82,0	61,8	53,4	89,3	62,2	57,0
CEM 30LL	43,8	26,8	22,6	72,6	43,6	38,0	77,3	49,3	43,4	83,0	50,9	44,2	83,2	51,7	44,5
CEM 30S	36,3	23,4	19,2	70,9	45,0	39,8	89,7	66,0	60,1	101,6	74,9	67,2	104,2	78,5	73,1
CEM 30V	31,7	22,8	18,1	56,2	39,0	33,2	71,9	52,0	46,7	84,0	61,7	56,3	93,2	65,9	60,5
CEM 50 (S-LL)	17,8	12,4	10,5	52,0	29,2	22,7	74,0	46,8	40,1	79,6	57,8	47,6	83,1	59,3	50,4
CEM 50 (V-LL)	14,8	12,0	11,2	39,6	24,3	22,2	53,5	32,9	26,6	61,4	41,2	33,1	68,6	45,6	35,3
CEM 50LL	20,1	13,8	11,1	43,7	23,9	19,6	50,4	29,6	23,7	55,0	30,6	24,0	55,9	30,4	24,7
CEM 50S	19,2	13,3	11,6	53,0	30,6	27,8	86,7	59,8	50,6	92,4	73,8	63,6	101,3	76,4	64,1
CEM 50V	12,2	11,4	11,0	34,5	22,9	21,9	47,3	35,4	25,8	59,2	41,5	32,9	66,2	48,8	38,8
Legenda:	32,5R			42,5N			42,5R			52,5N			52,5R		



Rys. 28. Wytrzymałość na ściskanie cementów wieloskładnikowych przy różnym stosunku wodno-cementowym dla cementów: A) żuźlowo-wapiennych (S-LL); B) popiołowo-wapiennych (V-LL); C) wapiennych (LL); D) żuźlowych (S); E) popiołowych (V)

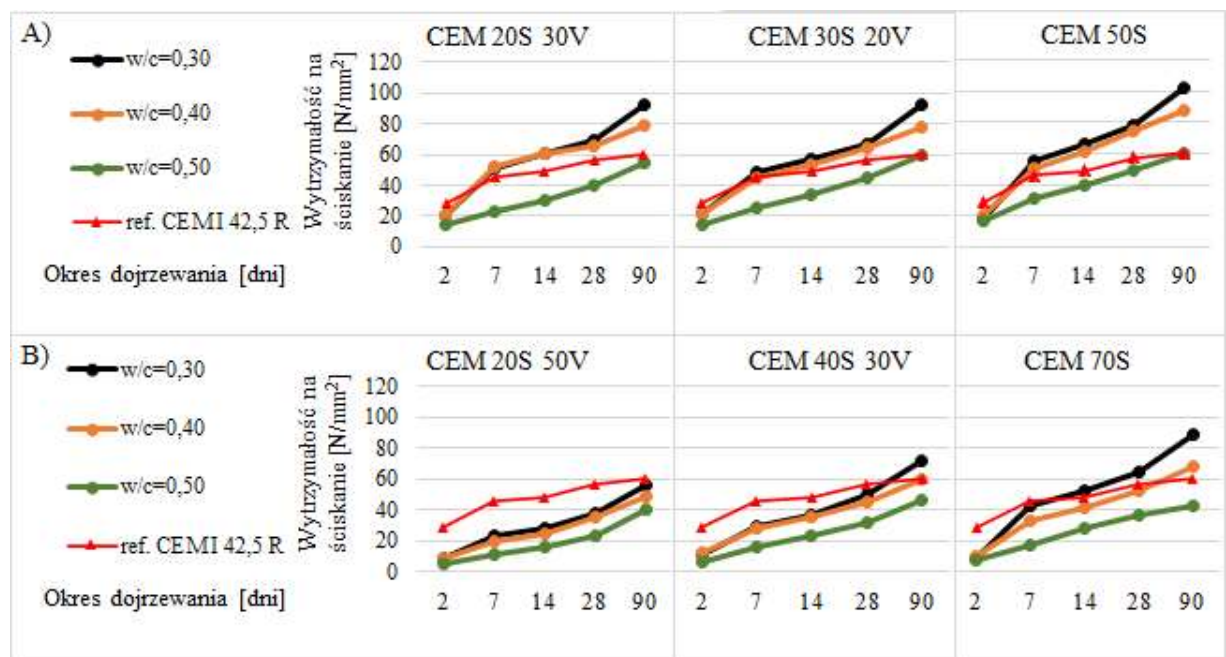
Otrzymane wyniki badań wytrzymałości na ściskanie (tab. 42 oraz rys. 28) potwierdzają znane zależności, a mianowicie spadek poziomu wytrzymałości przy $w/c=0,5$ i $w/c=0,55$ wraz ze wzrostem udziału nieklinkierowych składników głównych cementu. Wyjątek stanowi zmielony granulowany żużel wielkopieczowy. Wraz ze wzrostem jego udziału w składzie cementu spada dynamika przyrostu wytrzymałości we wczesnych okresach dojrzewania 2-dniowych i 7-dniowych, natomiast wzrasta dynamika przyrostu wytrzymałości w dłuższych okresach dojrzewania (56 dni i 90 dni). Dla wszystkich badanych zapraw cementowych obserwujemy wzrost wytrzymałości na ściskanie wraz z obniżeniem stosunku wodno-cementowego. Obniżenie stosunku wodno-cementowego do poziomu $w/c=0,35$ spowodowało znaczny wzrost uzyskanych poziomów wytrzymałości, szczególnie wysoki przyrost wytrzymałości obserwujemy we wczesnych okresach dojrzewania tj. po 2 i 7-dniach dla cementów zawierających 15% nieklinkierowych składników głównych. Dla wszystkich badanych cementów (z wyjątkiem cementów oznaczonych jako CEM 50 LL, CEM 50 S oraz CEM 50 V) poziom wytrzymałości 7-dniowej, uzyskany przy obniżonym stosunku $w/c=0,35$, przewyższał poziom wytrzymałości zaprawy normowej ($w/c=0,50$) po 28 dniach. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy zawierającej cement wapienny oznaczony CEM 15 LL (15% mielonego wapienia) po 7, 28 i 56 dniach dojrzewania była porównywalna z wytrzymałością cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R, natomiast po 2 oraz 90-dniach dojrzewania poziom wytrzymałości był niższy o 18% i 8% (rys. 28 c, tab. 43). Cement CEM 15 LL charakteryzował się najwyższym poziomem wytrzymałości wczesnej po 2-dniach dojrzewania z pośród badanych cementów wieloskładnikowych. Największy przyrost wytrzymałości na ściskanie cementów zawierających 15% nieklinkierowych składników głównych po 90 dniach dojrzewania zaobserwowano w przypadku cementów CEM 15 (S-LL) oraz CEM 15 (V-LL), poziom wytrzymałości był porównywalny z wytrzymałością cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R (rys. 28 A;B, tab. 43). Wraz ze zwiększeniem udziału zmielonego wapienia w składzie cementu, do 30% i 50% m.c, uzyskiwane poziomy wytrzymałości na ściskanie były niższe. Zastosowanie w składzie cementu mieszaniny żużla wielkopieczowego (S) i zmielonego wapienia (LL), a także popiołu lotnego krzemionkowego (V) i zmielonego wapienia (LL) w łącznej ilości 30%, przy obniżonym stosunku $w/c=0,35$, pozwoliło osiągnąć wyższy poziom wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R po 7, 28, 56 oraz 90 dniach dojrzewania (rys. 28 A;B, tab. 42). Porównując wyniki badań wytrzymałościowych cementów zawierających w swoim składzie zmielony wapień, o łącznej zawartości nieklinkierowych składników głównych w ilości 50% (rys. 28 A;B;C, tabela 42), obserwujemy wzrost poziomów wytrzymałości w przypadku cementów zawierających dwa nieklinkierowe składniki główne (cementy oznaczone CEM I 50 S-LL oraz CEM I 50 V-LL). Jest to efektem synergicznego oddziaływania na właściwości cementu poszczególnych jego składników – wapień zmiana porowatości (doszczelnienie mikrostruktury), popiół lotny (aktywność pucolanowa) i zmielony żużel (aktywność hydrauliczno-pucolanowa).

Uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych świadczą o istotnym wpływie, we wszystkich terminach badań, stosunku w/c na poziom wytrzymałości cementów niskoemisyjnych, we wszystkich terminach badań.

Możliwości kształtowania dynamiki rozwoju wytrzymałości cementów niskoemisyjnych wieloskładnikowych poprzez obniżenie stosunku w/c wykazano także w wynikach badań zamieszczonych w pracy [72]. Zostały one przeprowadzone na cementach wieloskładnikowych popiołowo-żużlowych. W tabeli 44 oraz na rysunku 28 przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań.

Tabela. 44. Wytrzymałość na ściskanie cementów wieloskładnikowych przy różnym stosunku wodno-cementowym [72]

Rodzaj cementu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po upływie														
	2 dni			7 dni			14 dni			28 dni			90 dni		
	stosunek wodno-cementowy														
	0,30	0,40	0,50	0,30	0,40	0,50	0,30	0,40	0,50	0,30	0,40	0,50	0,30	0,40	0,50
CEM I 42,5 R	-	-	28,5	-	-	45,9	-	-	48,7	-	-	57,1	-	-	60,1
CEM 50S	18,1	20,0	16,4	55,3	50,3	30,7	66,3	61,0	39,2	77,8	74,8	49,4	102,8	87,8	60,2
CEM 70S	9,4	9,9	7,2	42,7	33,2	17,9	52,9	42,1	27,9	64,7	52,3	36,4	88,3	68,0	42,3
CEM 20S 30V	20,9	20,8	13,9	50,8	52,1	23,2	61,1	60,5	30,8	69,5	65,8	40,4	92,2	79,3	54,6
CEM 30S 20V	21,9	21,5	15,0	48,4	44,5	25,0	56,9	53,5	34,2	67,3	64,0	44,4	92,1	77,3	59,8
CEM 20S 50V	9,2	9,4	5,4	23,6	19,7	11,0	28,5	24,9	15,9	38,4	35,0	23,1	56,1	49,1	39,9
CEM 40S 30V	11,2	11,9	6,6	29,5	28,3	15,8	36,3	35,2	23,9	50,4	45,2	31,9	71,8	59,4	46,6



Rys. 28 Wytrzymałość na ściskanie cementów wieloskładnikowych przy różnym stosunku wodno-cementowym dla cementów o zawartości nieklinkierowych składników głównych na poziomie: A) 50%; B) 70% [72]

Uzyskano podobne zależności, które były efektem synergicznego połączenia aktywności pucolanowej popiołu lotnego i aktywności hydraulicznej zmielonego granulowanego żużla wielkopieowego. Rozwiązania takie znajdują rozwiązania w praktyce budowlanej poprzez produkcję cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A,B (S,V), cementów wieloskładnikowych CEM V/A,B (S,V), jak i poprzez stosowanie popiołu lotnego jako dodatku typu II w składzie mieszanek betonowych zawierających cementy portlandzkie żużlowe CEM II/A,B-S lub cement hutniczy CEM III/A [72].

4.3.2. Właściwości cementów niskoemisyjnych z prób przemysłowych

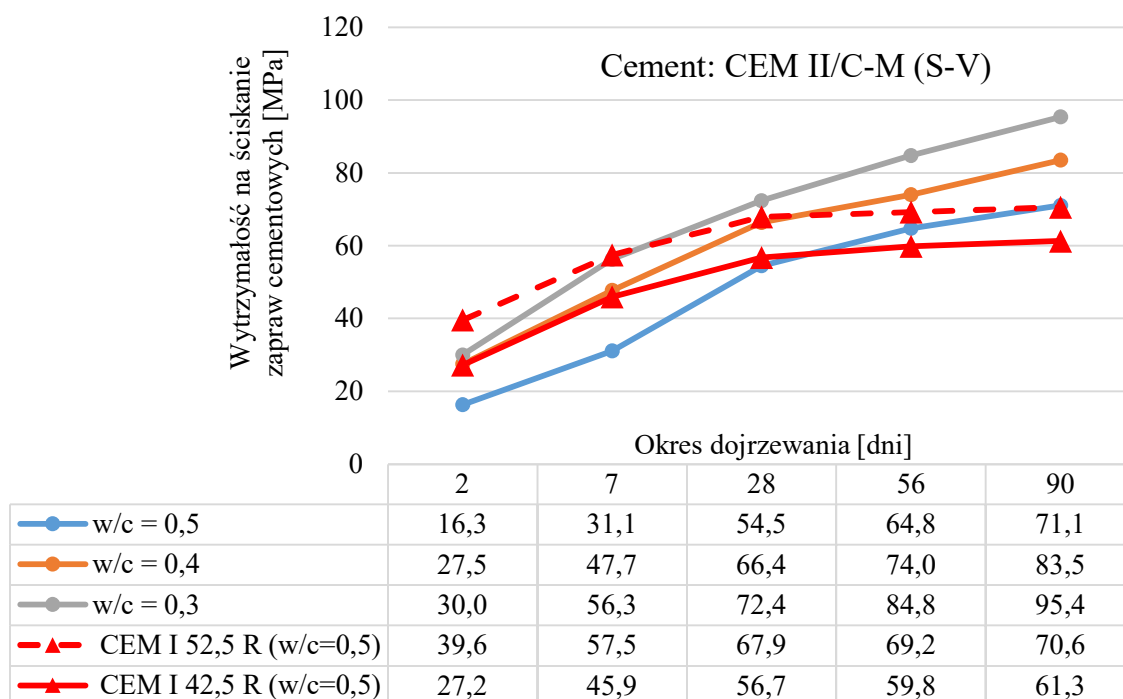
Właściwości normowe cementów z prób przemysłowych podano w punkcie 4.2.1. Ocenie wpływu, obniżonego stosunku wodno-cementowego w/c oraz temperatury dojrzewania, na dynamikę rozwoju wytrzymałości na ściskanie cementów niskoemisyjnych z prób przemysłowych poddano 6 cementów :

- cement portlandzki CEM I 52,5R (cement referencyjny);
- cement portlandzki CEM I 42,5R (cement referencyjny);
- cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M(S-V);
- cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M(S-LL);
- cement hutniczy CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA
- cement wieloskładnikowy CEM VI (S-V).

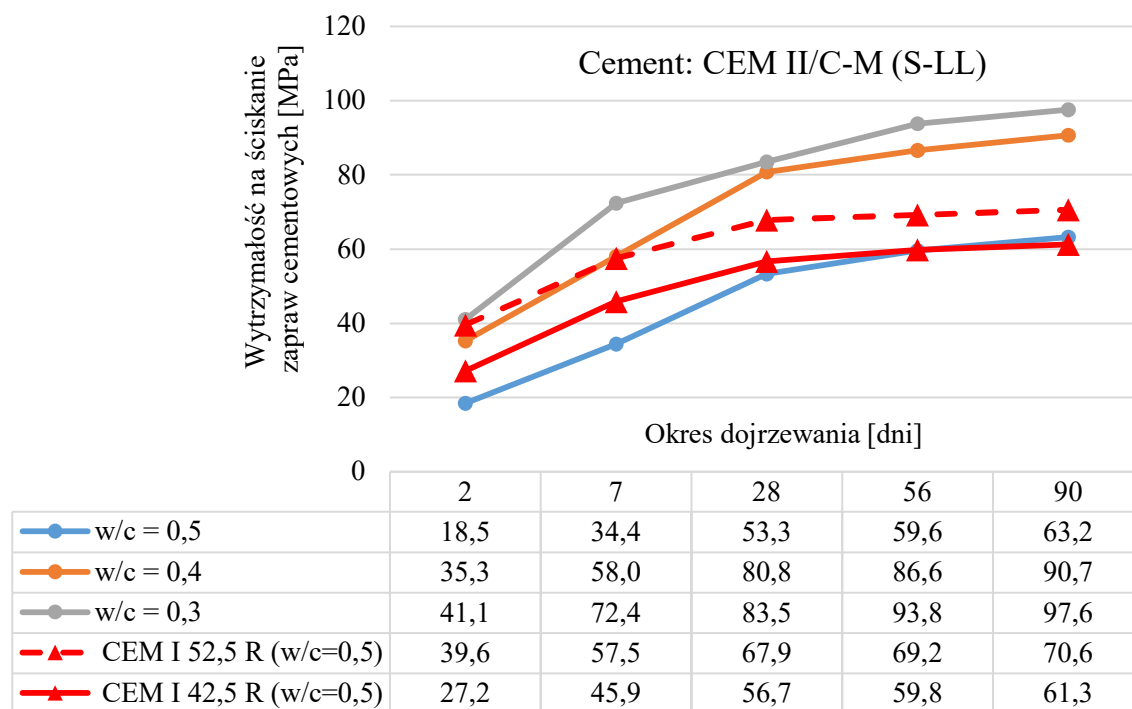
4.3.2.1. Wpływ stosunku w/c na właściwości wytrzymałościowe cementów niskoemisyjnych

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie zapraw normowych, a także zapraw z obniżonym stosunkiem wodno-cementowym ($w/c=0,4$ oraz $w/c=0,3$) przedstawiono na rysunkach 29, 30,31 oraz 32. W zaprawach o obniżonym stosunku w/c zastosowano domieszkę w postaci superplastyfikatora polimerowego w celu osiągnięcia rozplywu zaprawy zbliżonego do rozplywu przy stosunku $w/c=0,5$.

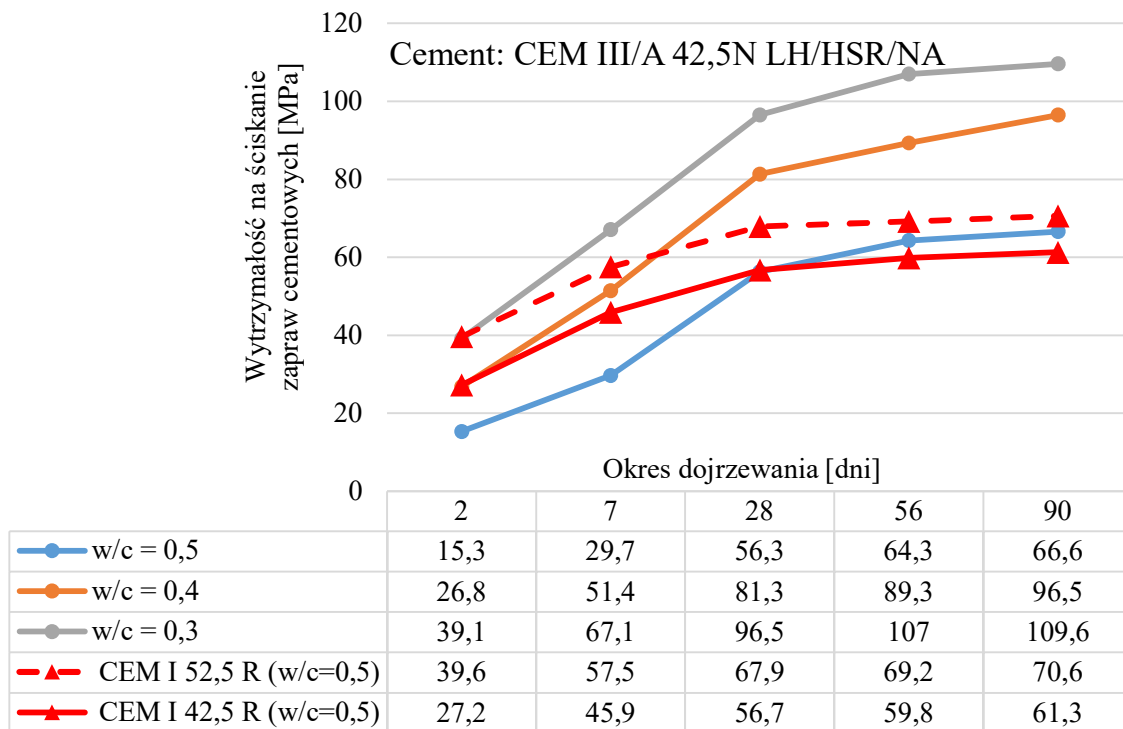
Wyniki badań (rys. 29÷32) potwierdziły uzyskane zależności przy cementach przygotowanych w skali laboratoryjnej. Użycie efektywnych domieszek pozwala uzyskać odpowiednią urabialność przy obniżonym stosunku w/c, a w efekcie uzyskać znaczne możliwości zwiększenia wytrzymałości na ściskanie (w tym wytrzymałości wczesnej po 2 i 7 dniach dojrzewania) cementów niskoemisyjnych. Podkreślić należy, iż po dłuższym okresie dojrzewania tj. po 56 i 90 dniach, przy stosunku $w/c=0,4$ oraz $w/c=0,3$, uzyskane poziomy wytrzymałości cementów niskoemisyjnych znacznie przewyższały poziom wytrzymałości na ściskanie cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R (przy stosunku $w/c=0,5$). Uzyskane wyniki badań pokazują, iż cementy niskoemisyjne, przy obniżonym stosunku w/c, charakteryzują się satysfakcjonującym, z punktu widzenia procesu budowlanego, poziomem wytrzymałości wczesnej, a zarazem pozwalają uzyskać wysokie wytrzymałości w dłuższych okresach dojrzewania (także podwyższeniu ulega trwałość).



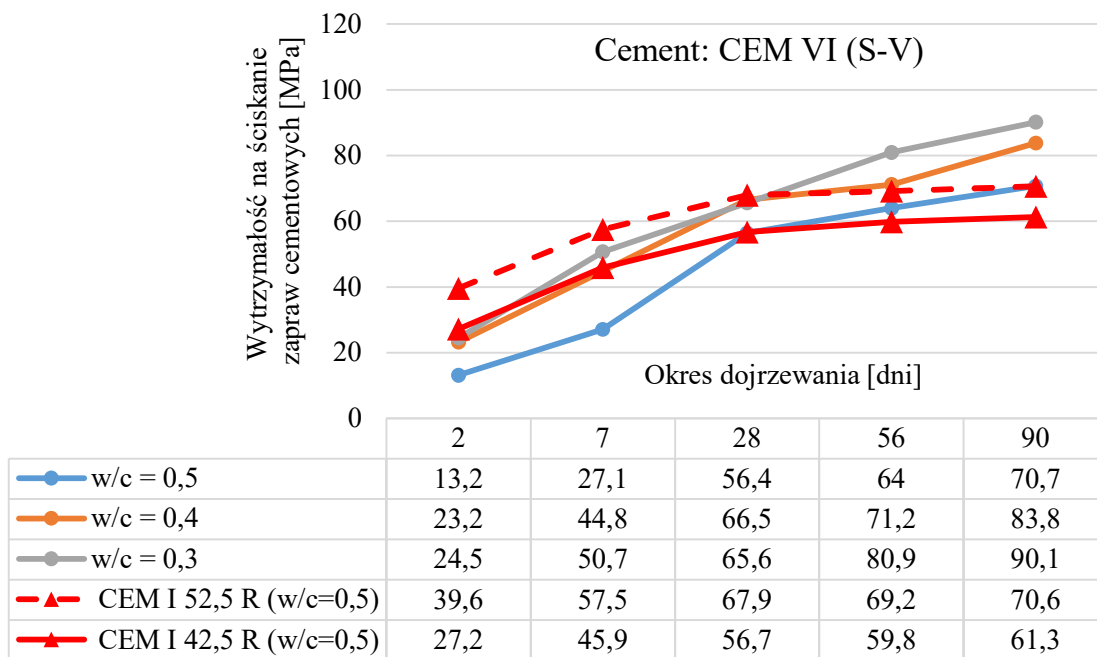
Rys. 29. Wpływ obniżonego stosunku w/c na wytrzymałość na ściskanie cementu portlandzkiego wielkoskładnikowego CEM II/C-M (S-V)



Rys. 30. Wpływ obniżonego stosunku w/c na wytrzymałość na ściskanie cementu portlandzkiego wielkoskładnikowego CEM II/C-M (S-LL)



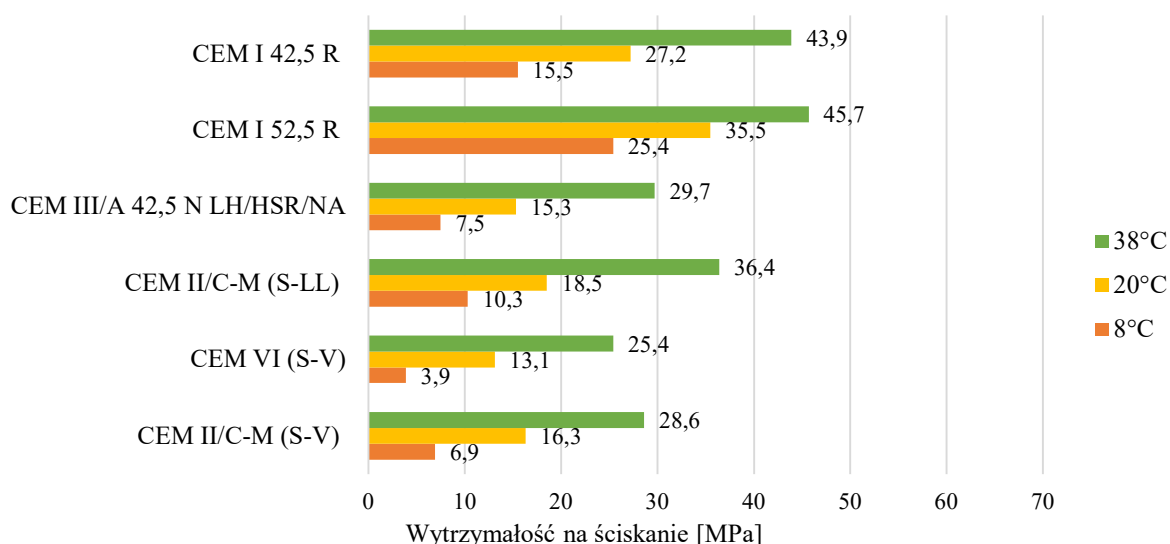
Rys. 31. Wpływ obniżonego stosunku w/c na wytrzymałość na ściskanie cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA



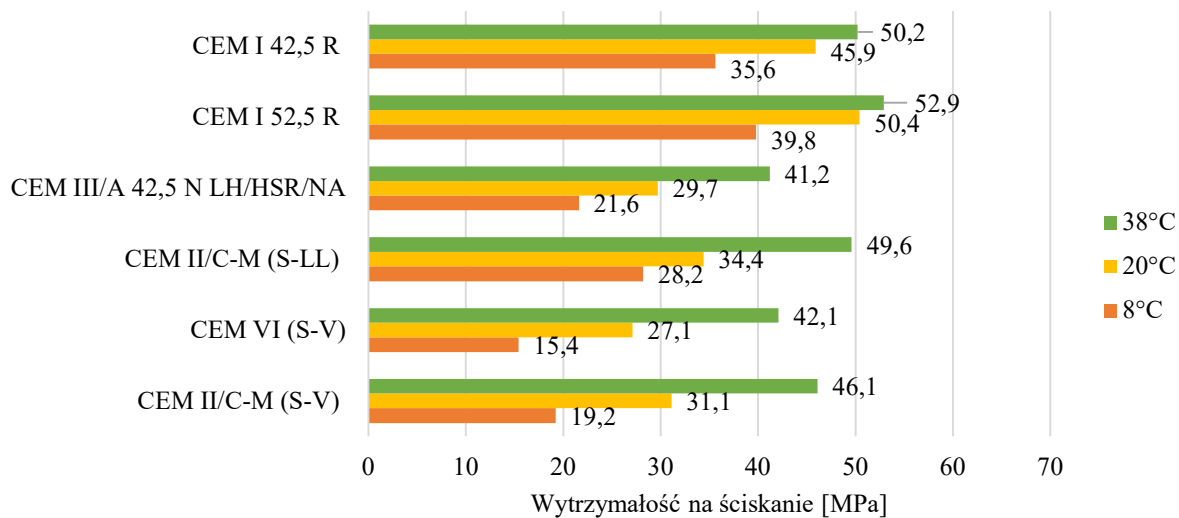
Rys. 32. Wpływ obniżonego stosunku w/c na wytrzymałość na ściskanie cementu wieloskładnikowego CEM VI (S-V)

4.3.2.2. Wpływ temperatury dojrzewania na wytrzymałości na ściskanie cementów niskoemisyjnych

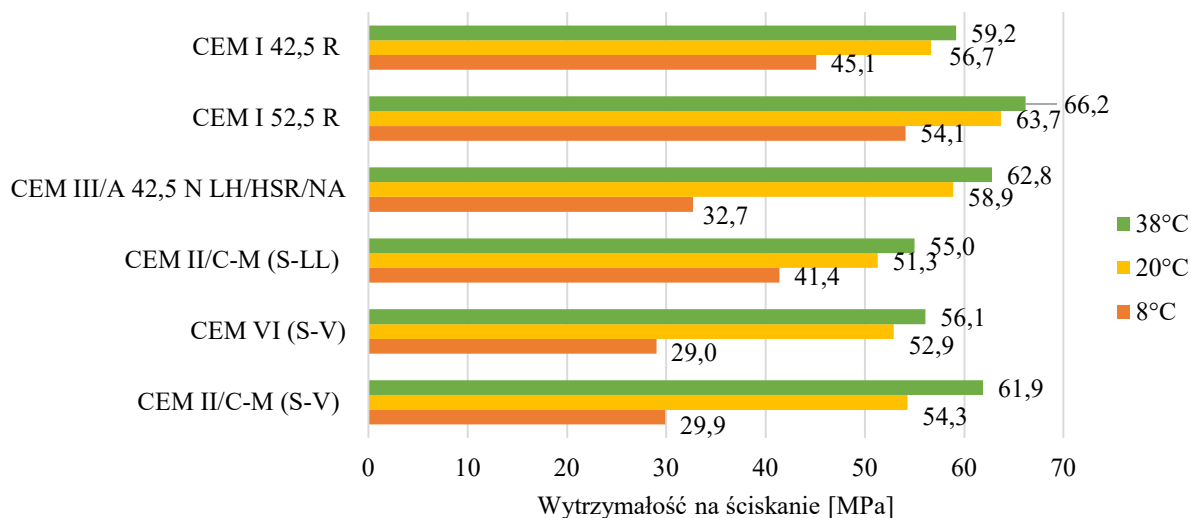
Określono wpływ temperatury dojrzewania (8°C, 20°C i 38°C) na poziom wytrzymałości na ściskanie zaprawy normowej (w/c=0,5) z użyciem cementów niskoemisyjnych. Wyniki przedstawiono na rysunkach 33÷35. Zdecydowanie największy wpływ temperatury na rozwój wytrzymałości na ściskanie cementów niskoemisyjnych zaobserwowano w początkowym okresie dojrzewania (po upływie 2 i 7 dni). W temperaturze dojrzewania wynoszącej 8°C uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie cementów niskoemisyjnych były wyraźnie niższe niż wytrzymałości cementów portlandzkich CEM I 42,5 R oraz CEM I 52,5 R (rys.33÷34). Najniższą dynamiką przyrostu wytrzymałości charakteryzował się cement wieloskładnikowy CEM VI (S-V) oraz cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M (S-V). Po 2 i 7 dniach dojrzewania, w temperaturze 38°C, uzyskane poziomy wytrzymałości na ściskanie cementów niskoemisyjnych były zbliżone do wytrzymałości cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R dojrzewającego w temp. 20°C, a w przypadku cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-LL) do poziomu wytrzymałości na ściskanie cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R dojrzewającego w temperaturze 20°C (rys.33÷34). Uzyskane wyniki badań potwierdzają niekorzystny wpływ obniżonej temperatury dojrzewania na rozwój wytrzymałości cementów niskoemisyjnych. Zapewnienie podwyższonej temperatury dojrzewania jest skutecznym sposobem poprawy dynamiki przyrostu wytrzymałości na ściskanie cementów niskoemisyjnych w początkowym okresie dojrzewania. Podwyższona temperatura dojrzewania cementów niskoemisyjnych wpływa również na uzyskanie wyższych wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania (rys 35). Fakt ten należy wykorzystać do szerszego stosowaniu w budownictwie tego rodzaju cementów w okresie letnim.



Rys. 33. Wpływ temperatury dojrzewania na wytrzymałość na ściskanie cementów po 2 dniach dojrzewania



Rys. 34. Wpływ temperatury dojrzewania na wytrzymałość na ściskanie cementów po 7 dniach dojrzewania

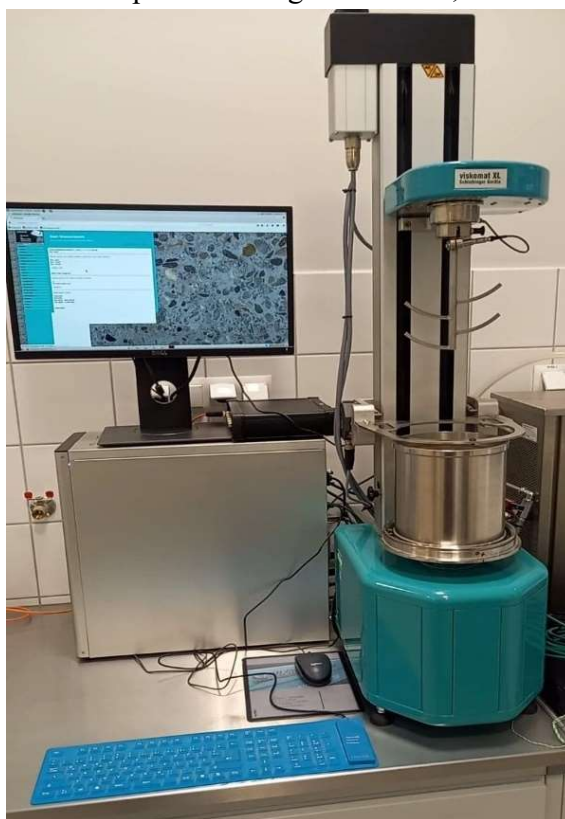


Rys. 35. Wpływ temperatury dojrzewania na wytrzymałość na ściskanie cementów po 28 dniach dojrzewania

Zdaniem autora, aktualnie są techniczne możliwości zapewnienia energii do podwyższenia temperatury w trakcie dojrzewania betonu, praktycznie w sposób zeroemisyjny, poprzez korzystanie z odnawialnych źródeł energii tj. fotowoltaiki, małych siłowni wiatrowych i magazynów energii (akumulatorów).

4.4.3. Wpływ rodzaju zastosowanego cementu niskoemisyjnego na reologię zapraw

W celu oceny wpływu poszczególnych rodzajów cementów niskoemisyjnych, z prób przemysłowych, na reologię zapraw przeprowadzono ocenę rozplywu wg metodyki zawartej w normie PN-EN 1015-3:2000 [89], a także za pomocą reometru Viskomatu XL firmy Schleibinger Gerate (rys. 36). Oznaczono lepkość plastyczną oraz granicę płynięcia po 5, 30, 60 oraz 90 minutach od zmieszania składników zapraw. Badania przeprowadzono dla cementów portlandzkich wieloskładnikowy CEM II/C-M(S-V) oraz CEM II/C-M(S-LL), cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA oraz cementu wieloskładnikowego CEM VI (S-V). Jako referencyjnego użyto cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R.



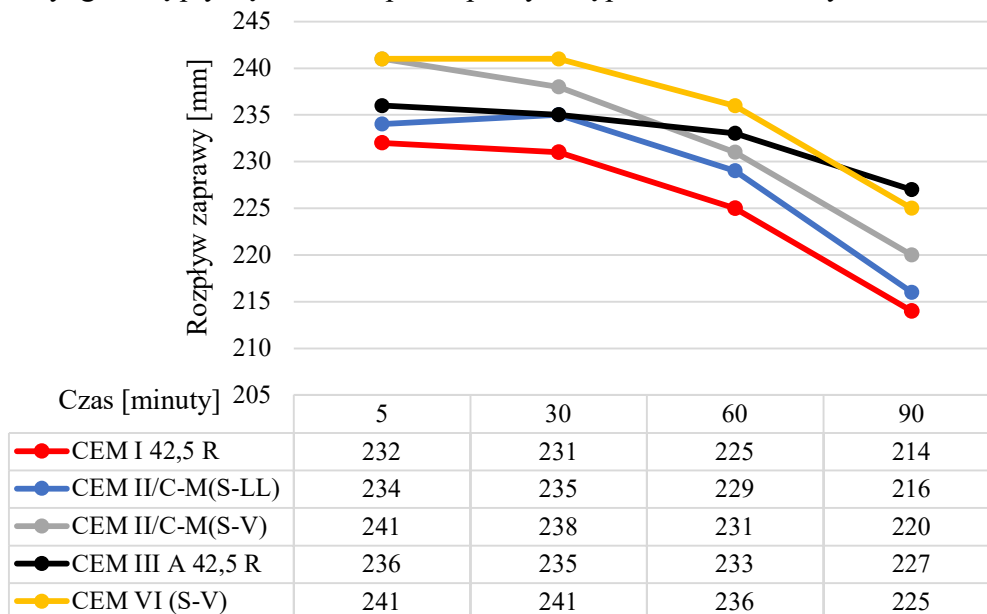
Rys. 36. Reometr typu Viskomatu XL użyty do określenia lepkości plastycznej oraz granicy płynięcia zapraw

Proporcję cementu oraz piasku przyjęto jak w zaprawie normowej (stosunek masowy 1:3). Ze względu na zakres pomiarowy Viskomatu XL stosunek w/c zwiększono z poziomu w/c=0,5 (zaprawa normowa) do poziomu w/c=0,6. Do badań użyto piasku 0/2 mm, którego właściwości podano w punkcie 4.2.2.1. Założono, iż pod wpływem obciążenia zaprawy zachowują się jak ciało lepkoplastyczne wg uproszczonego modelu Binghama. Wyniki reometryczne wyznaczono posługując się równaniem:

$$M = g + hN \text{ [Nm]}$$

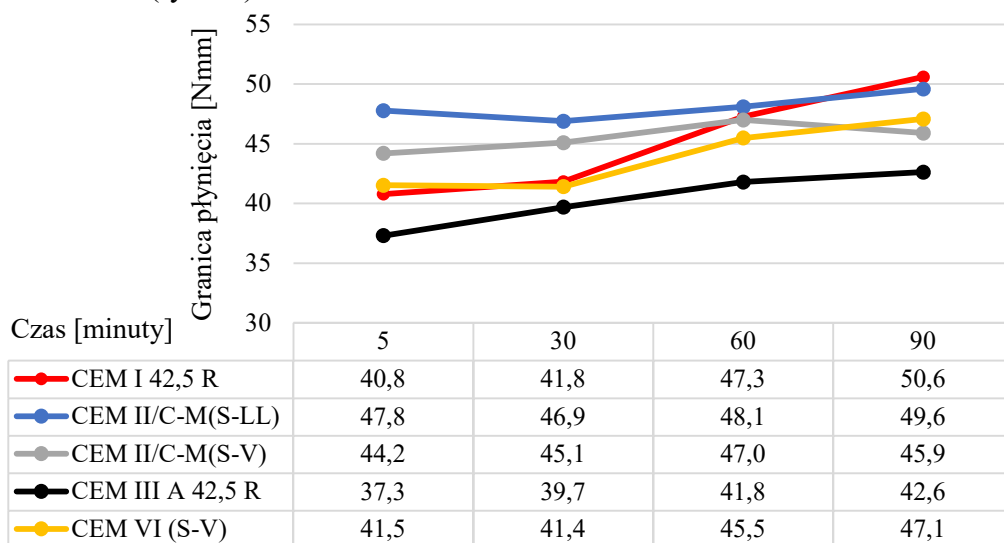
gdzie: M – moment oporu ścinania [Nm], g – graniczny opór ścinania [Nm], h – opór płynięcia lepkiego [Nms], N – prędkość obrotowa [s^{-1}]

W modelu uproszczonym Binghama opór ścinania g odpowiada granicy płynięcia τ_0 , a opór płynięcia lepkiego h – lepkości plastycznej η_{pl} . Wyniki badań reologicznych tj. rozplływ zaprawy, granicę płynięcia oraz lepkość plastyczną przedstawiono a rysunkach 37÷39.



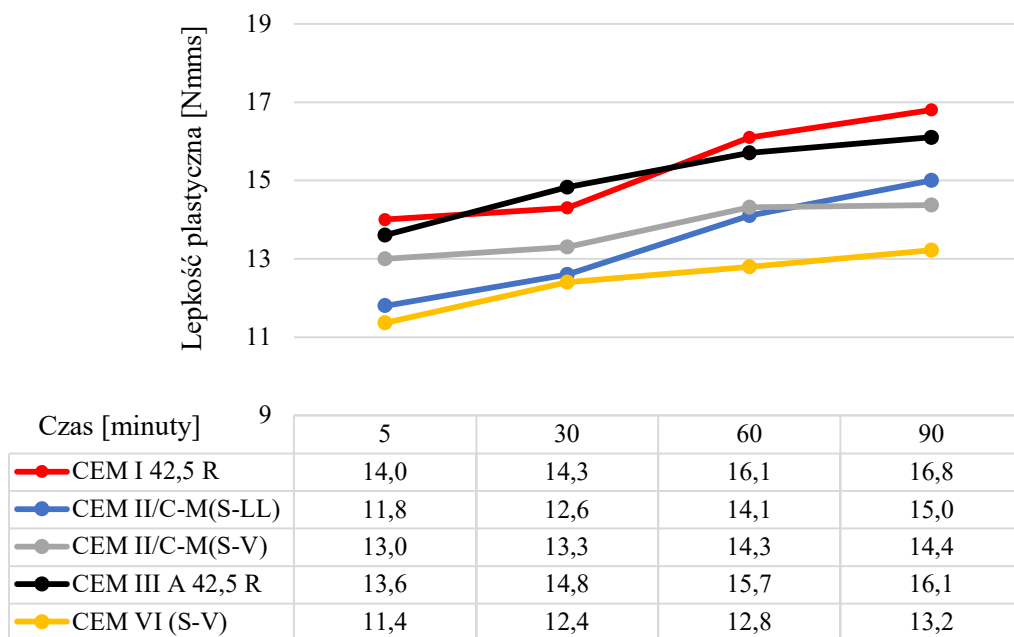
Rys. 37. Rozplływ zapraw z badanych cementów, [mm]

Zaprawy z użyciem cementów niskoemisyjnych charakteryzowały się większym rozplływem niż zaprawa z cementu referencyjnego CEM I 42,5 R ($w/c=0,6$). W okresie do 60 minut, od zarobienia zapraw, największym rozplływem charakteryzowały się zaprawy z użyciem cementów popiołowo-żuźlowych: cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-V) i cementu wieloskładnikowego CEM VI (S-V). Natomiast po upływie 90 minut największym rozplływem charakteryzowała się zaprawa z cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA (rys. 37).



Rys. 38. Granica płynięcia zapraw z badanych cementów, [Nmm]

Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M (S-LL) charakteryzował się największą granicą płynięcia po 5,30 i 60 minutach od zmieszania składników zaprawy; natomiast po 90 minutach granica płynięcia zaprawy z cementem portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/C-M(S-LL) była porównywalna z rozplywem zaprawy z cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Najmniejszą granicą płynięcia, we wszystkich terminach, miała zaprawa z cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA (rys. 38).



Rys. 39. Lepkość plastyczna zapraw z badanych cementów, [Nmms]

Zaprawy z użyciem cementów trójskładnikowych (niskoemisyjnych) charakteryzowały się mniejszą lepkością plastyczną niż zaprawa z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R oraz cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA, których lepkość plastyczna była zbliżona. Największy wzrost lepkości plastycznej w czasie wykazała zaprawa z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M(S-LL). Najniższą lepkością plastyczną charakteryzowała się zaprawa z cementem wieloskładnikowym CEM VI (S-V) (rys.39).

Wyniki badań zamieszczone na rys. 37÷39 pokazują korzystny wpływ cementów niskoemisyjnych na właściwości reologiczne kompozytów cementowych. Szczególnie korzystne oraz stabilne w czasie właściwości reologiczne uzyskano przy stosowaniu cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-V) oraz cementu wieloskładnikowego CEM VI (S-V). Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M (S-LL) charakteryzował się większą zmiennością właściwości reologicznych w czasie, zbliżoną do cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Analiza wyników badań reologicznych cementów niskoemisyjnych wskazuje, iż mieszanki betonowe wykonane z ich użyciem powinny charakteryzować się lepszą urabialnością

oraz stabilniejszym utrzymaniem właściwości reologicznych w czasie niż mieszanki betonowe wykonane z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R oraz cementu hutniczego CEM III/A.

4.5. Właściwości betonów z zastosowaniem cementów niskoemisyjnych

W rozdziale przeanalizowano wpływ zastosowania cementów niskoemisyjnych na właściwości mieszanki betonowej oraz betonu stwardniałego o różnym przeznaczeniu. Uwagę skupiono na możliwości aplikacji cementów niskoemisyjnych w betonach towarowych w klasie ekspozycji XC2, XC4 oraz XF3 (szersze stosowanie betonu w obiektach inżynierii komunikacyjnej), betonach przeznaczonych do prefabrykacji, betonie samozagęszczalnym SCC oraz betonie wysokowytrzymałościowym BWW, a także w betonie masywnym.

Mieszanki betonowe przygotowano z zastosowaniem mieszalnika laboratoryjnego Pemat Zyklus (rys.40). Zasadniczy proces mieszania trwał 90 sekund. Przed każdym pomiarem konsystencji mieszanki betonowej stosowano mieszanie dodatkowe trwające 30 sekund. Objętości zarobów dobierano w zależności od ilości i rodzaju wykonywanych próbek do badań, wahały się od 50 do 75 litrów. W tabeli 45 zestawiono zakres wykonywanych badań wraz z przyjętą metodyką badawczą.



Rys. 40. Laboratoryjny mieszalnik betonu typu Pemat Zyklus

Tabela 45. Metody badawcze mieszanek betonowych oraz betonów stwardniałych

Badany materiał	Właściwość	Metoda badawcza
Mieszanka betonowa	Gęstość	PN-EN 12350-6:2019-08 [140]
	Zawartość powietrza	PN-EN 12350-7:2019-08 [140]
	Opad stożka	PN-EN 12350-2:2019-07 [141]
	Rozpływ stożka	PN-EN 12350-8:2019 [142]
	L-pojemnik	PN-EN 12350-10:2012 [143]
	V-lejek	PN-EN 12350-9:2012 [144]
	J-pierścień	PN-EN 12350-12:2012 [145]
Beton stwardniały	Gęstość	PN-EN 12390-7:2019-08 [146]
	Wytrzymałość na ściskanie	PN-EN 12390-3:2019-07 [147]
	Mrozoodporność zwykła	PN-B-06265:2018-10 [103]
	Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem	PN-EN 12390-8:2019-08 [92]
	Charakterystyka porów powietrznych	PN-EN 480-11 [148]
	Skurcz betonu	PN-B-06714-23:1984 [149]
	Modułu sprężystości betonu	PN-EN 12390-13:2012-02 [150]

4.5.1. Cementy niskoemisyjne w składzie betonu zwykłego

4.5.1.1 Beton w klasie ekspozycji XC2 oraz XC4

W celu oceny możliwości aplikacji cementów niskoemisyjnych w powszechnych zastosowaniach budowlanych w budownictwie kubaturowym tj. do wykonywania fundamentów, ścian, stropów, słupów itp. określono właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu do zastosowania w klasie ekspozycji XC2 (przyjęto $w/c=0,65$) oraz XC4 (przyjęto $w/c=0,55$) wg PN-B 06265 [103]. Oznaczenia oraz składy betonów towarowych przedstawiono w tabelach 46 i 47.

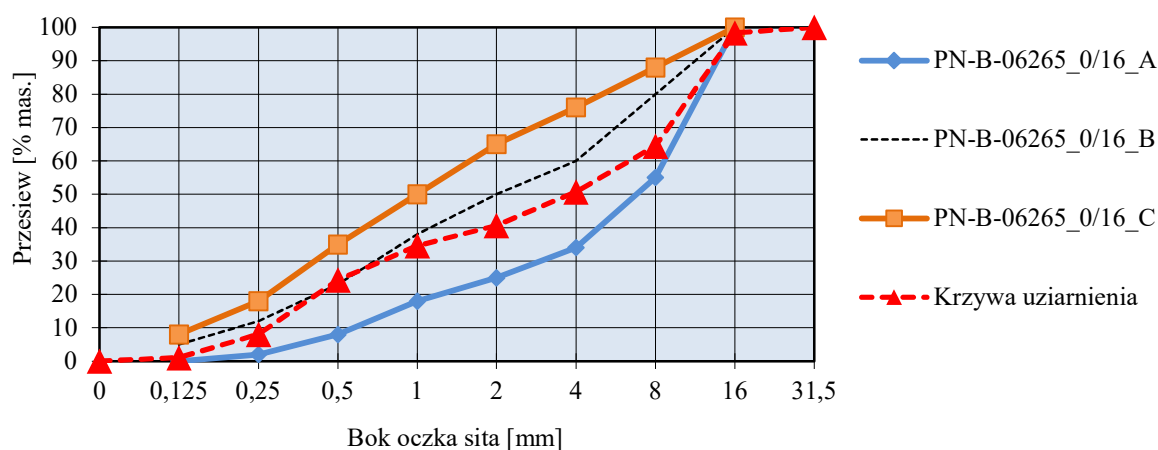
Tabela 46. Oznaczenia betonów zwykłych

Klasa ekspozycji	XC2	XC4
Rodzaj użytego cementu	Oznaczenie betonu	
CEM I 42,5 R	XC2 I	XC4 I
CEM II/C-M(S-LL)	XC2 II SL	XC4 II SL
CEM II/C-M(S-V)	XC2 II SV	XC4 II SV
CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	XC2 III	XC4 III
CEM VI (S-V)	XC2 VI SV	XC4 VI SV

Tabela 47. Skład betonów zwykłych

Składniki betonu	Jednostka	Klasa ekspozycji	
		XC2	XC4
Cement	kg/m ³	300	300
Woda	kg/m ³	195	165
Piasek 0-2 mm	kg/m ³	690-698	720-727
Żwir 2-8 mm	kg/m ³	436-441	455-459
Żwir 8-16 mm	kg/m ³	631-638	658-665
Superplastyfikator MasterEase 3040	% m.c.	-	0,55
Zawartość powietrza	% obj.	≤ 3,0	≤ 3,0
Stosunek w/c	-	0,65	0,55
Projektowana klasa konsystencji	-	S3	S3

Uwagę skupiono na określeniu wpływu cementów niskoemisyjnych na konsystencję mieszanki betonowej, rozwój wytrzymałości na ściskanie oraz na ocenie skurczu i szczelność betonu, jako podstawowych właściwości warunkujących stosowanie cementów niskoemisyjnych w typowych zastosowaniach budowlanych. Krzywą uziarnienia mieszanki kruszyw użytych w betonach przedstawiono na rysunku 41. Krzywa uziarnienia mieściła się między krzywymi granicznymi A oraz B dla maksymalnego wymiaru kruszywa $D_{max}=16$ mm wg PN-B 06265 [103], punkt piaskowy wynosił 40% masy kruszywa.



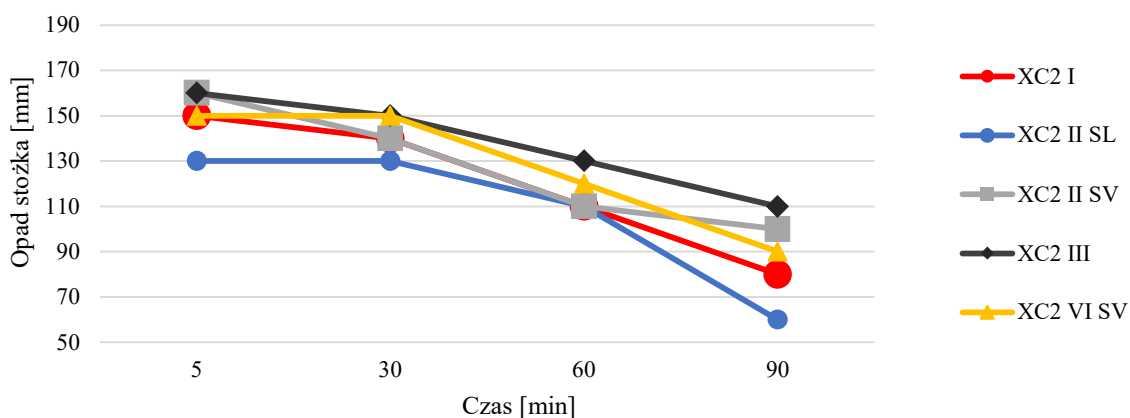
Rys. 41. Krzywa uziarnienia mieszanki kruszyw dla betonów w klasach ekspozycji XC2 oraz XC4

Konsystencję mieszanek betonowych oznaczono metodą opadu stożka (zgodnie z normą PN-EN 12350-2:2019-07 [141]) po 5,30,60 i 90-minutach od pierwszego kontaktu wody z cementem. Wyniki badań konsystencji mieszanek betonowych w klasach ekspozycji XC2 i XC4 przedstawiono w tabeli 48. Zawartość powietrza (wg normy PN-EN 12350-7:2019-08 [151]) oraz gęstość mieszanki betonowej (wg normy PN-EN 12350-6:2019-08 [140]) oznaczono po 60

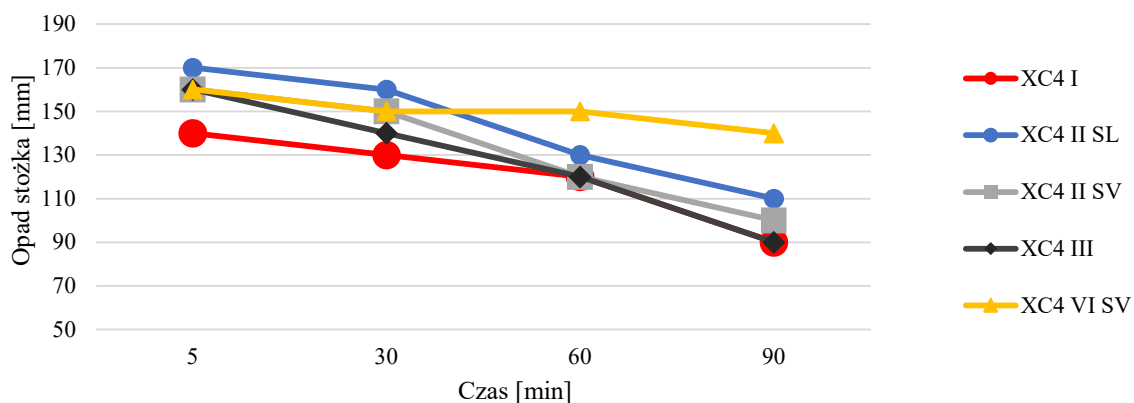
minutach od pierwszego kontaktu wody z cementem. Wyniki badań konsystencji mieszanek betonowych przedstawiono również na rysunkach 42 i 43.

Tabela. 48. Właściwości mieszanek betonowych oznaczonych jako XC2 oraz XC4

Oznaczenie betonu		Opad stożka [mm]				Zawartość powietrza [%]	Gęstość [kg/m ³]
		5 min	30 min	60min	90 min		
XC2 (w/c=0,65)	XC2 I	150	140	110	80	1,9	2990
	XC2 II SL	130	130	110	60	2,3	2259
	XC2 II SV	160	140	110	100	2,4	2248
	XC2 III	160	150	130	110	2,2	2251
	XC2 VI SV	150	150	120	90	2,5	2232
XC4 (w/c=0,55)	XC4 I	140	130	120	90	2,0	2302
	XC4 II SL	170	160	130	110	2,0	2289
	XC4 II SV	160	150	120	100	2,3	2263
	XC4 III	160	140	120	90	2,0	2271
	XC4 VI SV	160	150	150	140	2,4	2254



Rys. 42. Zmiana konsystencji mieszanek betonowych oznaczonych XC2 (w/c=0,65)

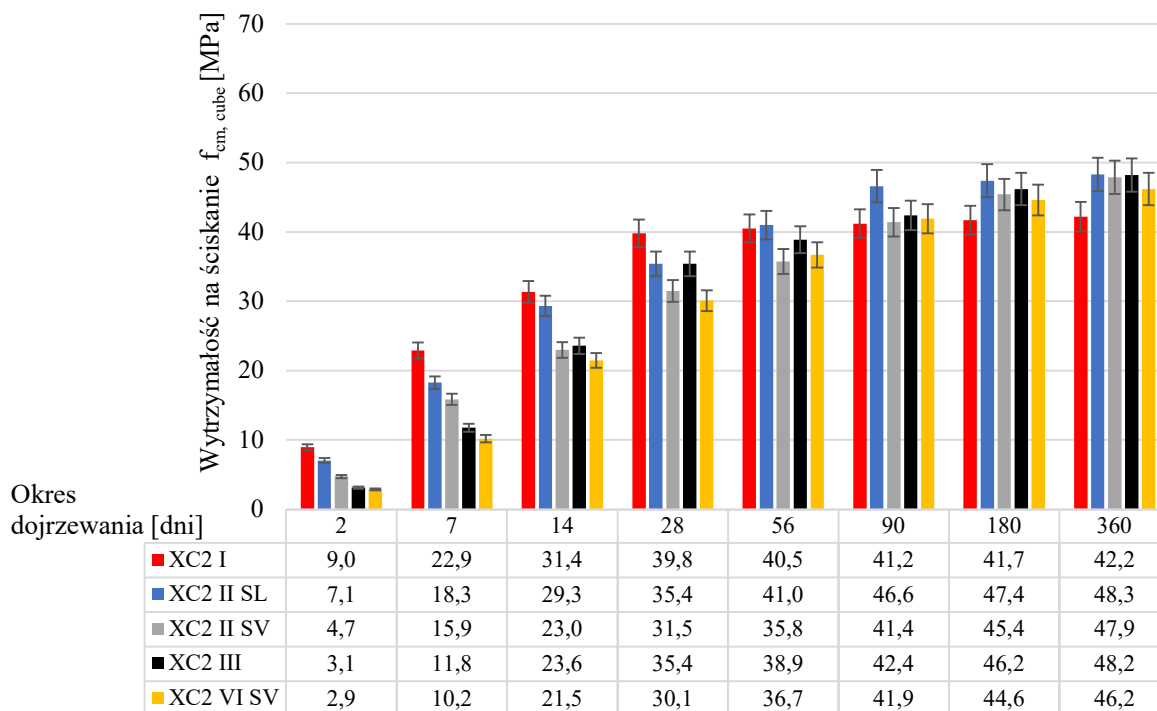


Rys. 43. Zmiana konsystencji mieszanek betonowych oznaczonych XC4 (w/c=0,55)

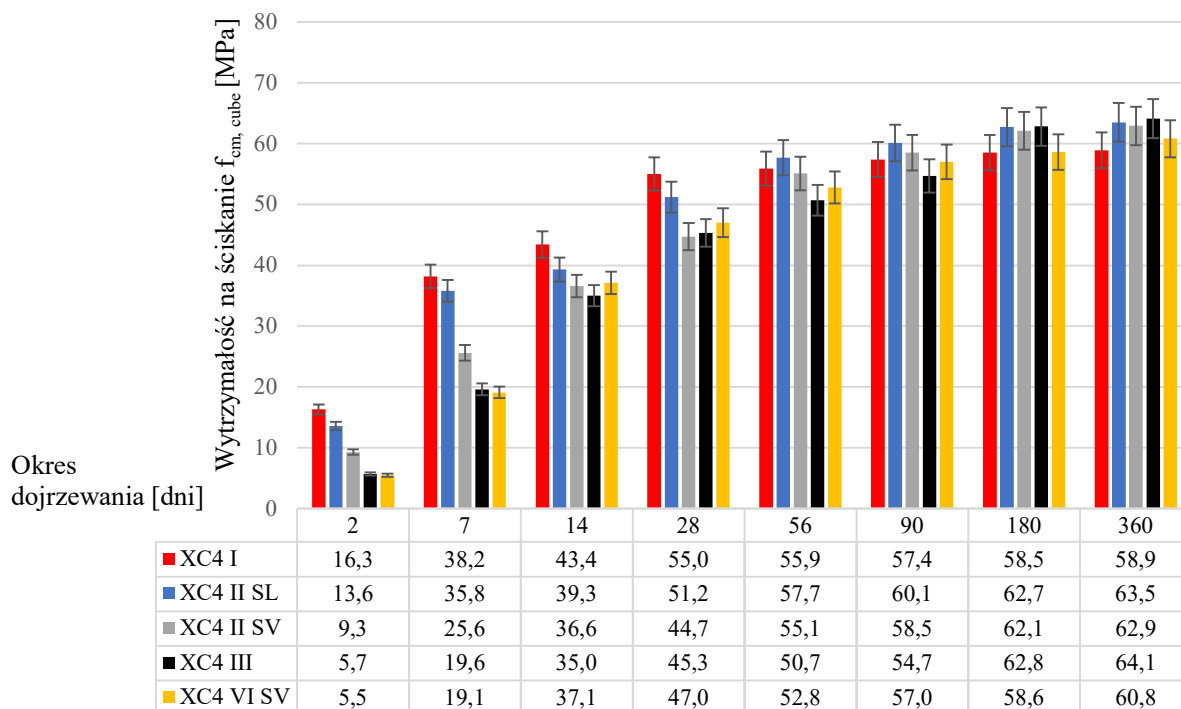
W aktualnych standardach technologicznych wykonywanie betonów o klasie wytrzymałości na ściskanie powyżej C12/15, bez zastosowania plastyfikatora lub superplastyfikatora, należy do rzadkości. Jednak, w celu oceny wpływu rodzaju cementu na utrzymanie konsystencji mieszanki betonowej w czasie w zależności od rodzaju zastosowanego cementu niskoemisyjnego w betonach oznaczonych jako XC2, przyjęto stosunek $w/c=0,65$ oraz nie stosowano domieszek. Użycie cementów niskoemisyjnych skutkowało lepszym lub porównywalnym efektem upłynnienia mieszanki betonowej w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R oraz zauważalny był mniejszy spadek konsystencji w czasie. Wyjątek stanowił cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M (S-LL). Mieszanka betonowa z jego użyciem charakteryzowała się najniższym opadem stożka, zarówno w okresie początkowym, jak i po 90 minutach od zarobienia (rys. 42). Efekt ten, zdaniem autora, jest związany z podwyższoną powierzchnią właściwą cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M(S-LL), co skutkowało podwyższoną wodożądnością.

Wyniki badań betonów oznaczonych jako klasa XC4 ($w/c=0,55$) potwierdzają poprawę właściwości reologicznych betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych względem zarówno betonu wykonanego z cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R, jak i wykonanego z cementu hutniczego CEM III/A 42,5N. Największym efektem upłynnienia mieszanki betonowej, w czasie 90 minut, charakteryzował się cement wieloskładnikowy CEM VI (S-V) (rys. 43).

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonów w klasach ekspozycji XC2 i XC4 przedstawiono na rysunkach 44 i 45 (wyniki stanowią średnią z badania sześciu próbek).



Rys. 44. Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm, cube}$ betonu oznaczonego jako XC2 ($w/c=0,65$)



Rys. 45. Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm, cube}$ betonu oznaczonego jako XC4 ($w/c=0,55$)

Zarówno, w przypadku betonów oznaczonych jako XC2 ($w/c=0,65$) oraz jako XC4 ($w/c=0,65$), betony wykonane z użyciem cementów niskoemisyjnych, w porównaniu do betonów referencyjnych z cementem CEM I 42,5 R, charakteryzowały się mniejszą dynamiką przyrostu wytrzymałości w okresie do 28-dnia dojrzewania oraz wyższą dynamiką przyrostu wytrzymałości po 28-dniu dojrzewania. Wytrzymałość na ściskanie betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych, po 56 oraz 90-dniach dojrzewania, była zbliżona do wytrzymałości betonów referencyjnych z cementem portlandzkim CEM I 42,5 R. Po 180 i 360-dniach dojrzewania poziomy wytrzymałości na ściskanie betonów z cementów niskoemisyjnych przewyższały wytrzymałość betonów referencyjnych z cementem portlandzkim CEM I 42,5 R. Najwyższe wytrzymałości wczesne po 2 oraz 7 dniach dojrzewania uzyskano stosując cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/C-M(S-LL) oraz CEM II/C-M(S-V) (rys. 44 i 45).

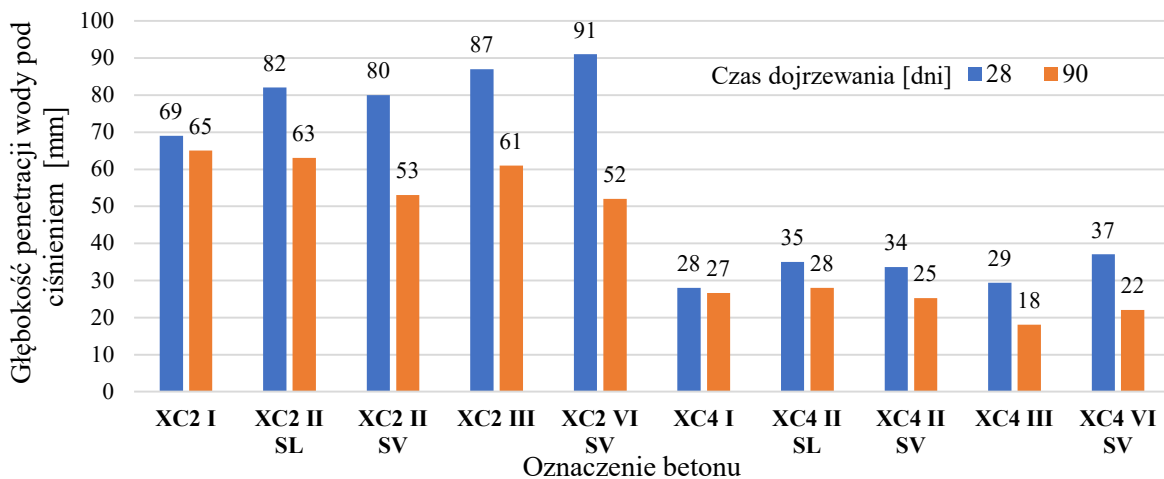
W przypadku betonu oznaczonego jako XC4 ($w/c=0,65$) z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M(S-LL), po 2 oraz 7 dniach dojrzewania, poziom wytrzymałości był zbliżony do betonu referencyjnego z cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R (rys. 45). Wraz ze zwiększeniem stosunku w/c z poziomu 0,55 (betony XC4) do poziomu $w/c=0,65$ (betony XC2) zauważyć można znaczny spadek wytrzymałości na ściskanie, zarówno we wczesnym, jak i wydłużonym okresie dojrzewania. Spadek ten jest związany ze znacznym wzrostem porowatości betonu, o czym świadczą wyniki badań głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wykonanych zgodnie z normą PN-EN 12390-8:2019-08 [92]. Ocenie podlega głębokość wnikania wody pod ciśnieniem 500 ± 50 kPa w czasie 72 ± 2 godzin w strukturę betonu. Wodę, pod ciśnieniem, należy przyłożyć do powierzchni próbki pozbawionej zaczynu

cementowego. Badanie wykonuje się na próbkach sześciennych o boku 150 mm. W celu dokonania pomiaru głębokości penetracji wody próbkę, po okresie ekspozycji wody pod ciśnieniem, należy rozłupać na pół w kierunku prostopadłym do powierzchni na którą było przekazywane ciśnienie. Badanie należy rozpocząć po minimum 28-dniach dojrzewania betonu. Stanowisko badawcze do badania głębokości penetracji wody pod ciśnieniem przedstawiono na rysunku 46.



Rys. 46. Stanowisko badawcze do badania głębokości penetracji wody pod ciśnieniem

Uzyskane wyniki głębokości penetracji wody pod ciśnieniem przedstawiono na rysunku 48. Zaobserwować można większe doszczelnienie struktury betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych i cementu hutniczego CEM III/A, w okresie między 28 a 90-dniem, dojrzewania w porównaniu do betonów referencyjnych z cementu portlandzkiego CEM I. Wyniki stanowią średnią z pomiarów głębokości z trzech próbek betonu użytych do badań.

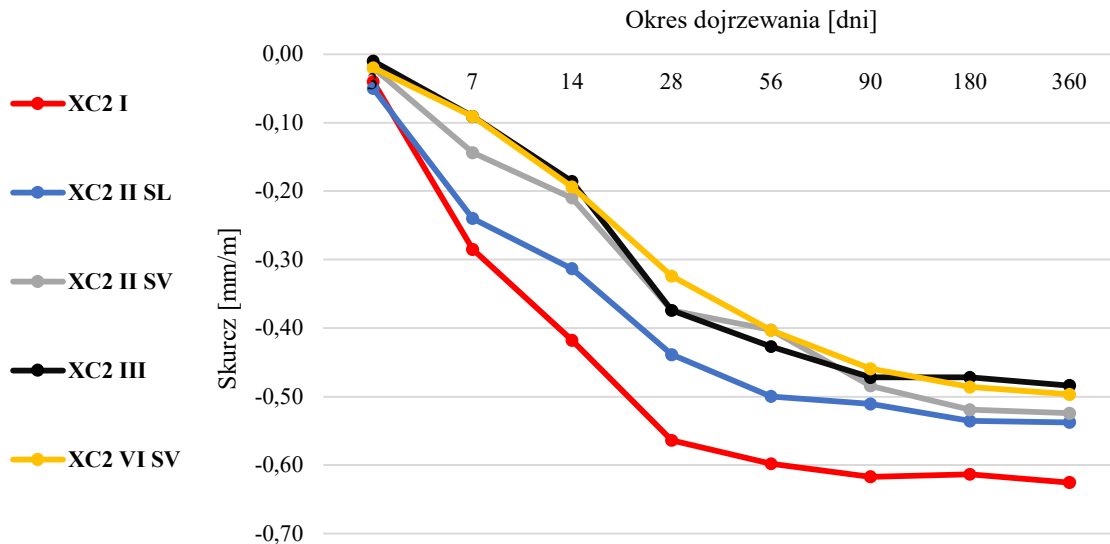


Rys. 48. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem betonów w klasie ekspozycji XC2 oraz XC4

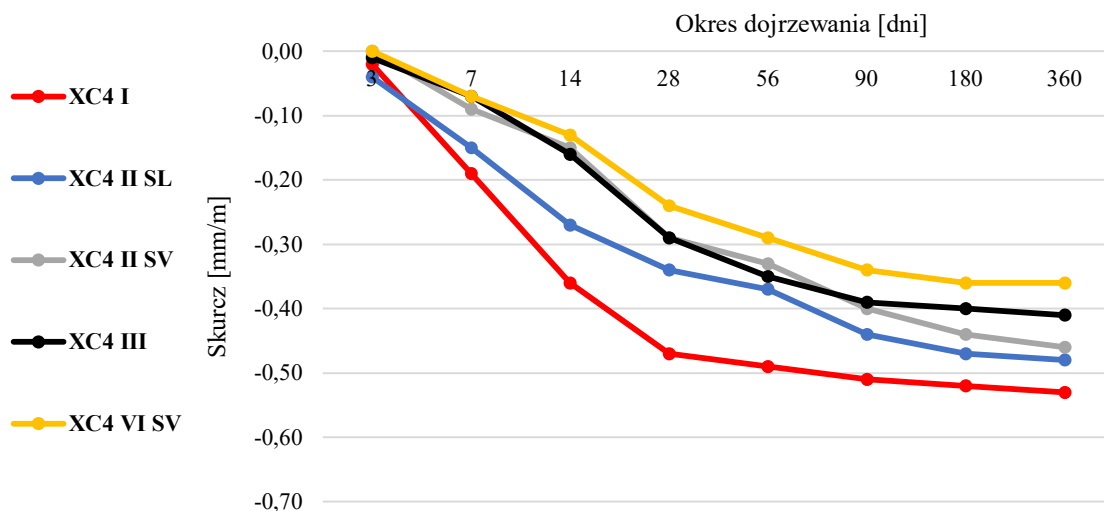
Skurcz betonu na skutek błędów wykonawczych (nieodpowiedniej pielęgnacji ciepło-wilgotnościowej) może prowadzić do powstania zarysowań oraz spękań betonu. Skurcz betonu zależy od wielu czynników, m.in. od temperatury oraz wilgotności powietrza, efektywności prowadzenia procesu pielęgnacji betonu, ale także od składu betonu (głównie stosunku w/c oraz ilości i rodzaju zastosowanego cementu). Przeanalizowano wpływ stosunku w/c oraz rodzaju cementu na skurcz betonu. Pomiaru skurczu dokonano metodą Amslera (rys. 47), zgodnie z normą PN-B-06714-23:1984 [149], po 3,7,14,28,56,90,180 oraz 360 dniach dojrzewania betonu. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 48 i 49. Wyniki stanowią średnią z trzech próbek użytych do badań.



Rys. 47. Pomiar skurczu betonu metodą Amslera



Rys. 48. Skurcz betonów w klasie ekspozycji XC2 (w/c=0,65)



Rys. 49. Skurcz betonów w klasie ekspozycji XC4 ($w/c=0,55$)

Betony wykonane z użyciem cementów niskoemisyjnych charakteryzowały się mniejszymi skurczem niż beton z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Najmniejszym skurczem charakteryzowały się betony z użyciem cementu wieloskładnikowego CEM VI (S-V) oraz cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA. Betony z cementami portlandzkimi wieloskładnikowymi CEM II/C-M (S-LL) oraz CEM II/C-M (S-V) charakteryzowały się większym skurczem niż betony z cementem hutniczym CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA. Zaobserwowano również większy skurcz betonu z cementem portlandzkimi wieloskładnikowymi CEM II/C-M (S-LL) w porównaniu do pozostałych cementów niskoemisyjnych, szczególnie w okresie pierwszych 14-dni dojrzewania. Cementy niskoemisyjne wykazywały mniejszą podatność na wzrost skurczu wraz ze wzrostem stosunku w/c w betonie (rys. 48 i 49).

Uzyskane wyniki badań pokazują przydatność cementów niskoemisyjnych do wykonywania elementów powierzchniowych np. płyt fundamentowych oraz stropów, szczególnie w okresie letnim. Niestety, musi być wydłużona pielęgnacja wilgotnościowa (wolne narastanie wytrzymałości w pierwszych 7-dniach dojrzewania i przy obniżonej temperaturze).

4.5.1.2. Beton w klasie ekspozycji XF3

Cykliczne zamrażanie i rozmrażanie jest jednym z najczęściej spotykanych oddziaływań środowiskowych w klimacie środkowo-europejskim powodującym korozję destrukcyjną stwardniałego betonu. Elementy betonowe/żelbetowe narażone na bezpośrednie oddziaływanie środowiska zewnętrznego powinny wykazywać odporność na destrukcyjne działanie cykli zamrażania/rozmrażania. Poziom tej odporności zależy od projektowanego okresu trwałości konstrukcji. W ramach rozprawy przeanalizowano możliwość zastosowania cementów niskoemisyjnych w składzie betonu w klasie ekspozycji XF3 o stopniu mrozoodporności zwykłej F150, co odpowiada wymaganiom wielu zastosowań betonu np. w budownictwie kubaturowym, w obiektach inżynierii komunikacyjnej, itp. Składy badanych betonów oraz oznaczenia przedstawiono w tabeli 49.

Tabela 49. Skład oraz oznaczenia betonów w klasie ekspozycji XF3

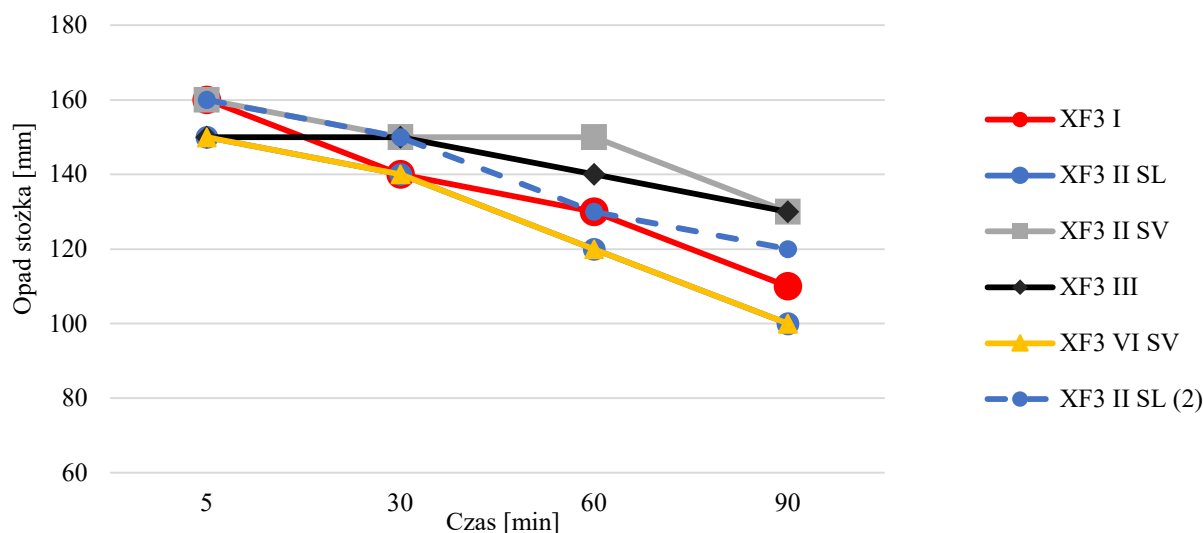
Składniki betonu	Jednostka	Oznaczenie betonu					
		XF3 I	XF3 II SL	XF3 II SV	XF3 III	XF3 VI SV	XF3 II SL(2)
Rodzaj cementu	-	CEM I 42,5 R	CEM II/C-M (S-LL)	CEM II/C-M (S-V)	CEM III/A 42,5N LH/HSR/A	CEM VI (S-V)	CEM II/C-M (S-LL)
Ilość cementu	kg/m ³	330					350
Woda	kg/m ³	155					158
Piasek 0-2 mm	kg/m ³	705	705	698	703	699	697
Żwir 2/8 mm	kg/m ³	445	445	441	444	442	437
Żwir 8/16 mm	kg/m ³	644	644	638	642	693	636
Superplastyfikator MasterGlenium Sky 591	% m.c.	0,55	0,57	0,55	0,55	0,57	0,73 ¹⁾
Domieszka napowietrzająca MasterAir 3012	% m.c.	0,12	0,15	0,18	0,15	0,18	0,25
Projektowana zawartość powietrza	% obj.	5,0					
Stosunek w/c	-	0,47					0,45
Projektowana klasa konsystencji	-	S3					

¹⁾ zastosowano superplastyfikator MasterSure1200

Wyniki badań właściwości mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 50 oraz na rys. 50. Zakładano utrzymanie konsystencji mieszanek betonowych w klasie konsystencji S3 w czasie 90 minut. W celu spełnienia tego wymagania betony z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-LL) (beton oznaczony jako XF3 II SL) oraz cementu wieloskładnikowego CEM VI (S-V) (beton oznaczony jako XF3 VI) wymagały zwiększonego dozowania superplastyfikatora. Ilość domieszki napowietrzającej dobrano tak, aby zawartość powietrza w mieszankach betonowych badana zgodnie z normą PN-EN 12350-7:2019-08 [151] wynosiła ok. 5,0 % objętości (tabela 49). Uzyskane poziomy napowietrzenia zawierały się w przedziale od 4,7 do 6,2% obj. (tabela 50). Betony z użyciem cementów niskoemisyjnych, a szczególnie betony z użyciem cementów zawierających w swoim składzie popiół lotny krzemionkowy (V), wymagały zwiększonego dozowania domieszki napowietrzającej. Gęstość mieszanek betonowych oznaczono, zgodnie z PN-EN 12350-6:2019-08 [140] po 90 minutach od momentu wymieszania składników. Wyniki podano w tabeli 50.

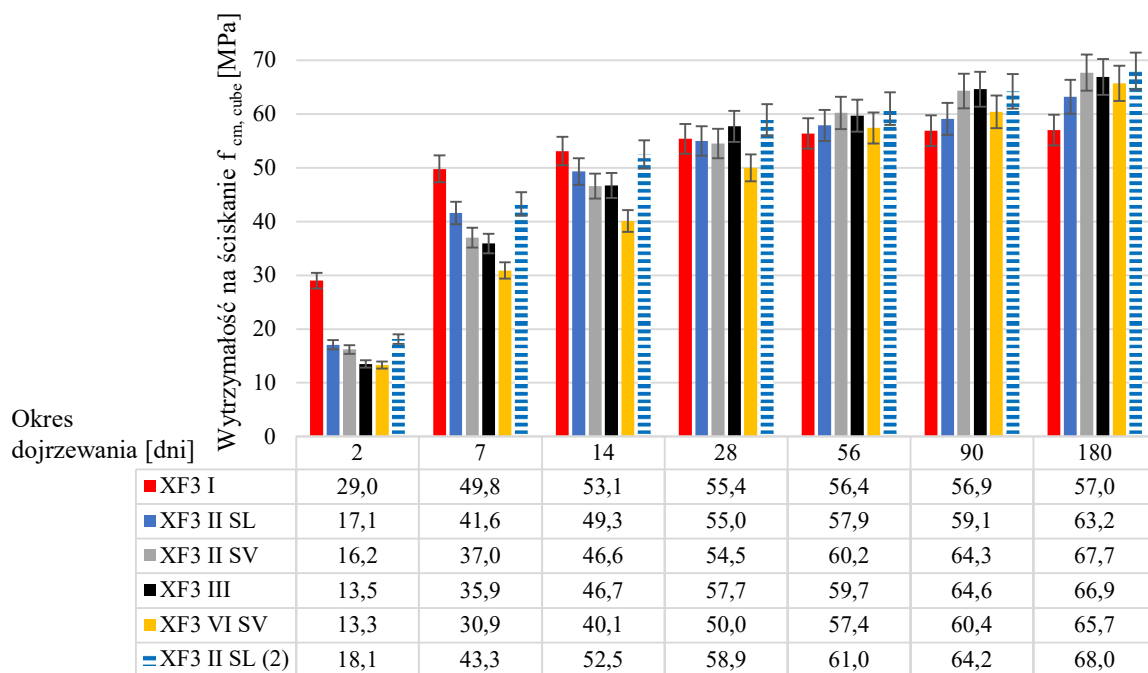
Tabela 50. Właściwości mieszanek betonowych dla klasy ekspozycji XF3

Oznaczenie betonu	Rodzaj cementu	Opad stożka [mm]				Zawartość powietrza [% obj.]				Gęstość [kg/m ³]
		5 min	30 min	60min	90 min	5 min	30 min	60min	90 min	
XF3 I	CEM I 42,5 R	160	140	130	110	4,7	4,7	4,9	5,0	2281
XF3 II SL	CEM II/C-M (S-LL)	150	140	120	100	5,1	4,9	4,9	4,7	2291
XF3 II SV	CEM II/C-M (S-V)	160	150	150	130	4,8	5,2	5,7	6,0	2278
XF3 III	CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	150	150	140	130	5,2	5,3	5,8	6,0	2265
XF3 VI SV	CEM VI (S-V)	150	140	120	100	4,9	4,9	5,3	5,5	2213
XF3 II SL (2)	CEM II/C-M (S-LL)	160	150	130	120	5,8	6,0	6,1	6,2	2272



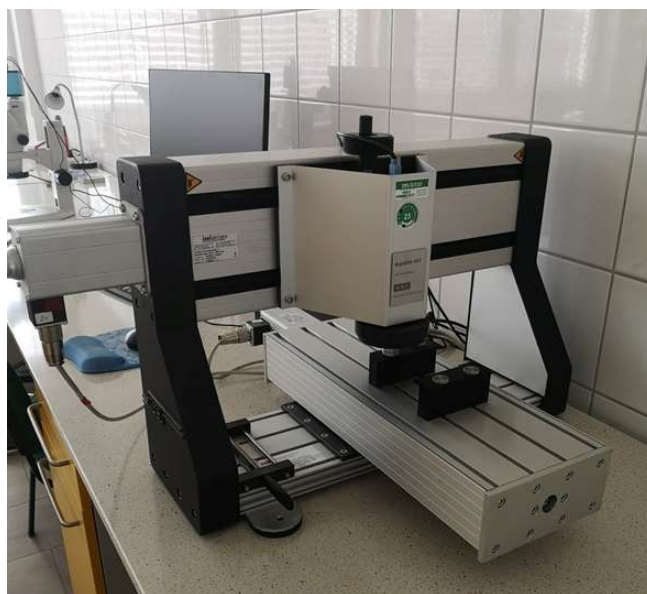
Rys. 50. Zmiana konsystencji mieszanek betonowych XF3

Wytrzymałość na ściskanie betonów dla klasy XF3 przedstawiono na rys. 51. Należy zauważyć, że do 14 dni dojrzewania betony z użyciem cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C-M (S-LL) oraz CEM II/C-M (S-V) charakteryzowały się wyższą wytrzymałością na ściskanie niż beton XF3 III z użyciem cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA (rys. 51). Po 28 dniach dojrzewania poziom wytrzymałości na ściskanie wszystkich betonów spełniał wymagania dla klasy wytrzymałościowej C35/45. W czasie dojrzewania dłuższym niż 28 dni, wytrzymałości na ściskanie betonów z użyciem cementów trójskładnikowych, przewyższały wytrzymałości uzyskane dla betonu referencyjnego z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R (beton XF3 I) oraz były zbliżone do wytrzymałości betonu z użyciem cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA (beton XF3 III) (rys. 51).



Rys. 51. Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm, cube}$ betonów XF3

W celu oceny mrozoodporności betonów dla klasy ekspozycji XF3 wykonano badania dla stopnia mrozoodporności zwykłej F150 (tabela 51). Badania wykonano po 28 oraz 90-dniach dojrzewania betonu. W celu oceny kompatybilności stosowanego układu domieszek z cementami niskoemisyjnymi oznaczono charakterystykę porów powietrznych w stwardniałym betonie (tabela 51). Badanie wykonano zgodnie z normą PN-EN 480-11 [148] za pomocą automatycznego systemu RapidAir 457 firmy Germann Instruments (rys. 52).



Rys. 52. Automatyczny system do analizy struktury napowietrzenia betonu RapidAir 457

Z sześciennych próbek betonu o długości boku 100 mm wycięto plaster o grubości około 25mm. Plaster wycięto prostopadle do powierzchni górnej (zacieranej) próbki betonu, a następnie poddano go szlifowaniu i polerowaniu w celu uzyskania ostrych krawędzi pustek powietrznych na powierzchni zglądu. Szczególnie trudne jest uzyskanie ostrych krawędzi pustek powietrznych, dla których płaszczyzna przecięcia przebiega powyżej połowy średnicy. Kontrastowanie powierzchni zglądu uzyskuje się przy pomocy markera o ciemnym kolorze (tło) oraz białej pasty cynkowej wypełniającej pustki powietrzne. Stopień przygotowania powierzchni zglądu do badania ocenia się za pomocą mikroskopu optycznego, po czym umieszcza w urządzeniu badawczym, które automatycznie dokonuje analizy charakterystyki napowietrzenia betonu.

Tabela 51. Wyniki badań stopnia mrozoodporności zwykłej F150 oraz struktury napowietrzenia betonów oznaczonych jako XF3

Oznaczenie betonu	Mrozoodporność zwykła F150						Struktura napowietrzenia betonu		
	Okres dojrzewania	Średni spadek masy ΔmF	Średnia wytrzymałość próbek porównawczych fF1	Średnia wytrzymałość próbek mrożonych fF2	Średni spadek wytrzymałości ΔfF	Wymagania zgodnie z PN-B-06265 [103]	Całkowita zawartość powietrza A	Współczynnik rozmieszczenia porów L	Zawartość mikroporów <0,3mm A300
XF3 I	28	0,8	53,1	51,6	2,8	próbki nie wykazują pęknięć $\Delta mF \leq 5$ $\Delta fF \leq 20$	6,1	0,163	1,9
	90	0,6	55,1	53,8	2,4		6,1	0,163	1,9
XF3 II SL	28	próbki popękały po 90 cyklach					4,8	0,323	0,8
	90	2,1	54,1	40,3	25,5				
XF3 II SV	28	1,9	49,2	45,6	7,3		6,8	0,162	1,7
	90	1,2	58,3	54,5	6,5				
XF3 III	28	0,3	53,0	47,5	10,4		7,1	0,188	2,1
	90	0,5	59,2	53,6	9,5				
XF3 VI SV	28	2,2	46,2	38,6	16,5		6,3	0,256	1,4
	90	1,8	55,7	47,5	14,7				
XF3 II SL (2)	28	2,4	55,0	47,2	14,2	6,8	0,171	2,2	
	90	1,8	60,1	53,4	11,1				

Betony z użyciem cementów niskoemisyjnych spełniły wymagania dla stopnia mrozoodporności F150 po 28 oraz 90 dniach dojrzewania. Wyjątek stanowił beton XF3 II SL z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-LL). Beton XF3 II SL posiadał niekorzystną strukturą napowietrzenia (tabela 51). Mimo, że całkowita zawartość powietrza A w betonie wynosiła 4,8% obj., beton charakteryzował się bardzo niską zawartością mikroporów poniżej 0,3 mm - $A_{300}=0,8$ % obj. i zwiększonym współczynnikiem rozmieszczenia porów $L=0,323$ mm. W celu uzyskania betonu mrozoodpornego z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-LL) zaprojektowano dodatkowy beton oznaczony jako XF3 II SL (2). Dzięki zwiększeniu zawartości cementu z 330 kg/m^3 na 350 kg/m^3 , obniżeniu stosunku w/c oraz zastosowaniu innego rodzaju superplastyfikatora (tabela 64)

uzyskano znacznie lepszą strukturę napowietrzenia betonu, co przełożyło się na spełnienie kryteriów dla stopnia mrozoodporności zwykłej F150.

Jednym z kryteriów oceny mrozoodporności zwykłej betonu, zgodnie z normą PN-B 06265 [103] jest porównanie wytrzymałości na ściskanie próbek poddawanych cykлом zamrażania/rozmarzania z wytrzymałością tzw. świadków, czyli próbek nie poddawanych cykлом zamrażania/rozmarzania. W przypadku betonów charakteryzujących się wysoką dynamiką przyrostu wytrzymałości na ściskanie w wydłużonych okresach dojrzewania na wynik badania mrozoodporności zwykłej, oprócz destrukcyjnego działania mrozu, wpływa również fakt, iż procesy hydratacji (stopień hydratacji) w obniżonych temperaturach ulegają spowolnieniu lub całkowicie ustają, podczas gdy wytrzymałość próbek porównawczych przechowywanych w wodzie o temperaturze $18^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ narasta w sposób naturalny. Dlatego też istotne jest, aby badania trwałościowe, a w szczególności badania mrozoodporności betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych rozpoczynać po okresie 90 dni dojrzewania.

Uzyskane wyniki badań własnych świadczą o możliwości uzyskania betonu mrozoodpornego w stopniu F150 z użyciem cementów niskoemisyjnych. W tym celu istotne jest sprawdzenie kompatybilności stosowanego układu domieszek oraz cementu i uzyskanie prawidłowej struktury napowietrzenia betonu. Pomocna może być ocena struktury napowietrzenia mieszanki betonowej wykonana metodą AVA (struktura napowietrzenia mieszanki betonowej). Wyraźną poprawę wyników mrozoodporności betonu uzyskujemy rozpoczynając badanie w czasie równoważnym wynoszącym 90 dni, kiedy stopień hydratacji cementów niskoemisyjnych jest znacznie wyższy niż po upływie 28 dni.

4.5.2. Możliwości zastosowania cementów niskoemisyjnych w prefabrykacji

Uzyskane wyniki badań właściwości betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych dla klasy ekspozycji XC2, XC4 oraz XF3 wykazują szereg pozytywnych właściwości umożliwiających ich szerokie aplikowanie w budownictwie. Jednak niższa dynamika przyrostu wytrzymałości na ściskanie we wczesnym okresie dojrzewania, po 2 i 7-dniach dojrzewania, jest często czynnikiem zniechęcającym do stosowania cementów niskoemisyjnych w technologiach wytwarzania elementów betonowych prefabrykowanych. W ostatnich latach w budownictwie obserwujemy renesans prefabrykacji, gdzie szybki przyrost wytrzymałości betonu jest szczególnie pożądanym. W związku z powyższym podjęto próbę, poprawy dynamiki przyrostu wytrzymałości wczesnej betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych. W tym celu stosowano zabiegi technologiczne takiej jak: obniżenie stosunku w/c, zastosowanie domieszki przyspieszających twardnienie, a także podwyższoną temperaturę dojrzewania. Do badań, jako cement referencyjny, stosowano cement portlandzki CEM I 52,5 R (oznaczenie betonu P1) oraz cementy niskoemisyjne: cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M(S-LL) (oznaczenie betonu P2) i cement wieloskładnikowy CEM VI (S-V) (oznaczenie betonu P6). Składy betonów wraz z przyjętymi oznaczeniami przedstawiono w tabeli 52.

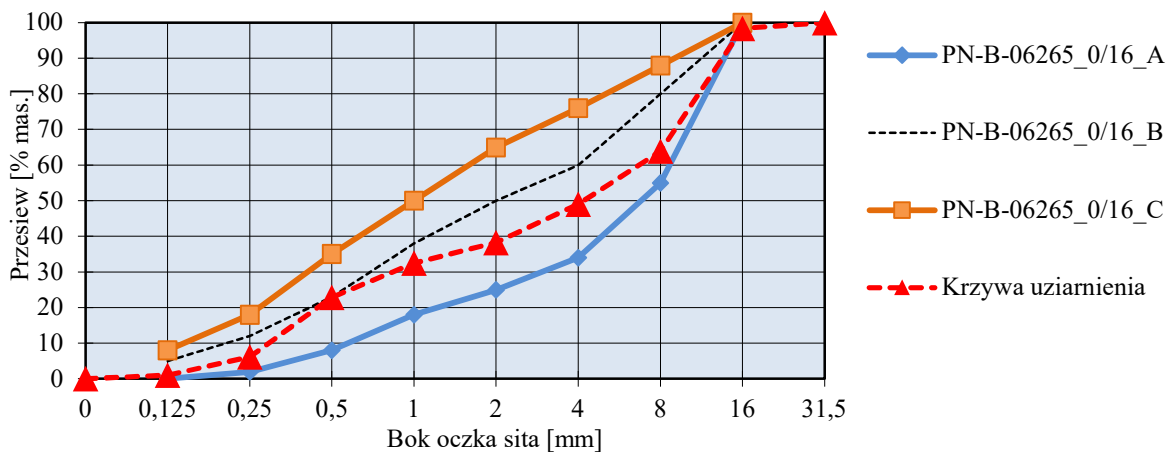
Betony wykonano w trzech wariantach :

- 1) o stosunku w/c=0,45 bez domieszki przyspieszającej twardnienie (oznaczenia betonów P1, P2, P6) – dozowanie superplastyfikatora MasterEase 3040 w ilości 0,63% m.c.;
- 2) o stosunku w/c= 0,45 z domieszką przyspieszającą twardnienie w ilości 4,0% m.c. (oznaczenia betonów P1X, P2X, P6X) – dozowanie superplastyfikatora MasterEase 3040 w ilości 0,63% m.c., Jako przyspieszacz twardnienia zastosowano domieszkę MasterX-SEED 100 zawierającą zarodki fazy C-S-H stanowiących aktywator hydratacji cementu i wzrost wytrzymałości wczesnej betonu;
- 3) z obniżonym stosunkiem w/c=0,35 bez domieszki przyspieszającej twardnienie (oznaczenia betonów P1W, P2W, P6W) dozowanie superplastyfikatora MasterEase 3040 w ilości 0,90% m.c.

Tabela 52. Skład oraz oznaczenia betonów dla prefabrykacji

Składniki betonu	Jednostka	Oznaczenie betonu :								
		P1	P1X	P1W	P2	P2X	P2W	P6	P6X	P6W
Rodzaj cementu	-	CEM I 52,5 R			CEM II/C-M(S-LL)			CEM VI (S-V)		
Ilość cementu	kg/m ³	390								
Woda	kg/m ³	168	158	135	168	158	135	168	158	135
Piasek 0-2 mm	kg/m ³	666	666	697	666	666	697	659	659	690
Żwir 2-8 mm	kg/m ³	486	486	509	486	486	509	485	485	505
Żwir 8-16 mm	kg/m ³	617	617	646	617	617	646	610	610	639
Superplastyfikator MasterEase 3040	% m.c.	0,63	0,63	0,90	0,63	0,63	0,90	0,63	0,63	0,90
Domieszka przyspieszająca twardnienie MasterX-SEED 100	% m.c.	-	4,0	-	-	4,0	-	-	4,0	-
Projektowana zawartość powietrza	% obj.	≤ 3,0								
Stosunek w/c	-	0,45	0,45	0,35	0,45	0,45	0,35	0,45	0,45	0,35
Projektowana klasa konsystencji	-	S3								

Krzywą uziarnienia mieszanki kruszywowej zastosowanej w betonach przeznaczonych dla prefabrykacji przedstawiono na rysunku 53. Punkt piaskowy mieszanki wynosił 37,6 % masy kruszywa.



Rys.53. Krzywa uziarnienia mieszanki kruszyw dla betonów przeznaczonych dla prefabrykacji

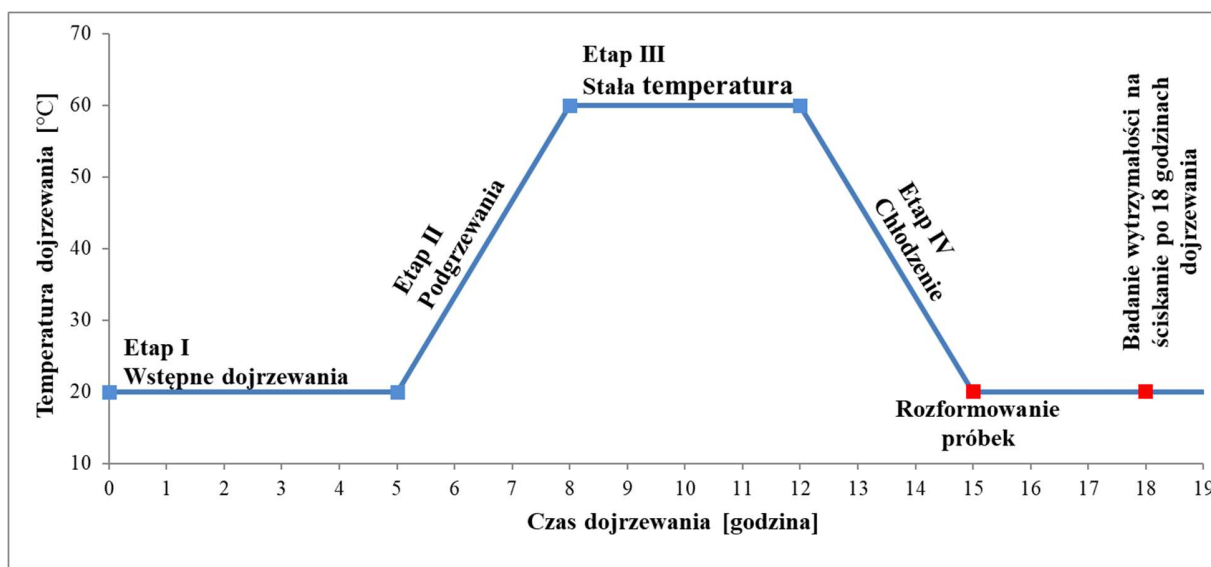
Wytrzymałość na ściskanie betonów określono po 18 i 24 godzinach oraz po 2,7,14,28,56,90-dniach dojrzewania w warunkach normowych.

W celu oceny wpływu podwyższonej temperatury na dynamikę narastania wytrzymałości próbki betonu poddano naporzaniu niskoprężnemu. Po zaformowaniu próbki przechowywano w warunkach normowych przez 5 godzin (etap I - dojrzewanie wstępne), po czym próbki zabezpieczono przed utratą wilgoci i umieszczono w suszarce firmy Memmert (rys. 54).



Rys. 54. Symulacja procesu naporzania niskoprężnego w suszarce firmy Memmert

Symulację procesu naporzania niskoprężnego prowadzono przez narastanie temperatury od 20°C do 60°C w czasie 3 godzin (etap II), utrzymywanie temperatury 60°C przez 4 godziny (etap III) oraz chłodzenie od 60°C do 20°C przez 3 godziny (etap IV) (rys.55). Po wychłodzeniu próbki rozformowano oraz oznaczono wytrzymałość na ściskanie po 18 i 24 godzinach oraz po 28 dniach dojrzewania. Właściwości mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 53.



Rys. 55. Symulacja procesu naparzenia niskoprężnego betonu

Tabela. 53. Właściwości mieszanek betonowych dla prefabrykacji

Wariant	Oznaczenie betonu	Rodzaj cementu	Opad stożka [mm]				Zawartość powietrza [% obj.]	Gęstość [kg/m ³]
			5 min	30 min	60min	90 min		
1) w/c= 0,45 bez domieszki przyspieszającej twardnienie	P1	CEM I 52,5 R	140	130	130	100	2,0	2341
	P2	CEM II/C-M (S-LL)	150	140	130	120	2,3	2312
	P6	CEM VI (S-V)	150	150	130	110	2,3	2305
2) w/c= 0,45 z domieszką przyspieszającą twardnienie	P1X	CEM I 52,5 R	170	160	140	110	1,9	2336
	P2X	CEM II/C-M (S-LL)	160	150	130	100	2,0	2319
	P6X	CEM VI (S-V)	160	140	120	90	2,3	2314
3) w/c= 0,35 bez domieszki przyspieszającej twardnienie	P1W	CEM I 52,5 R	140	130	110	100	2,1	2362
	P2W	CEM II/C-M (S-LL)	130	120	110	90	2,5	2342
	P6W	CEM VI (S-V)	140	130	120	100	2,4	2334

Konsystencja mieszanek betonowych mieściła się w granicach projektowanej klasy konsystencji S3 (opad stożka od 100mm do 150mm z uwzględnieniem tolerancji badania 10mm). Wyjątek stanowią betony wykonane w wariancie 2, które charakteryzowały się większym upłynnieniem po 5 minutach spowodowanym dodaniem płynnej domieszki przyspieszającej twardnienie w ilości 4% masy cementu. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonów przedstawiono w tabeli 54.

Tabela. 54. Wytrzymałości na ściskanie $f_{cm, cube}$ betonów przeznaczonych dla prefabrykacji

Oznaczenie betonu	Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm, cube}$ [MPa]								
	P1	P1X	P1W	P2	P2X	P2W	P6	P6X	P6W
Rodzaj cementu/ Termin badania	CEM I 52,5 R			CEM II/C-M(S-LL)			CEM VI (S-V)		
18 godzin	34,6	35,6	35,1	11,8	17,6	18,2	4,2	6,1	6,7
	41,0	49,7	46,2	25,7	26,8	30,2	20,2	22,8	24,9
24 godziny	37,7	39,2	40,8	15,8	21,0	22,6	8,5	10,6	13,4
	41,6	52,1	49,8	27,5	28,0	30,3	23,0	23,8	26,0
2 dni	46,4	52,8	51,1	26,0	27,0	33,8	16,1	17,7	19,2
7 dni	58,1	64,8	64,3	48,3	45,9	49,8	39,0	40,0	43,3
14 dni	72,7	70,2	70,7	54,3	48,3	54,5	48,7	47,7	51,3
28 dni	75,1	73,1	76,8	60,0	57,2	71,7	58,9	57,8	65,9
	75,0	67,3	74,5	62,4	56,9	70,0	54,9	54,4	67,5
56 dni	76,2	74,8	80,3	66,1	67,7	78,8	69,2	68,8	75,3
90 dni	78,1	76,5	81,6	69,9	70,8	83,4	72,8	70,9	76,1

Legenda:

	próbki dojrzewające w warunkach laboratoryjnych (temp. $20 \pm 2^\circ\text{C}$)
	próbki poddane procesowi naparzania

Betony z udziałem cementów niskoemisyjnych charakteryzowały się niższymi wytrzymałościami na ściskanie, szczególnie w okresie do 28 dni dojrzewania. Pomimo, że uzyskiwane poziomy wytrzymałości na ściskanie cementów niskoemisyjnych po 18 godzinach dojrzewania były znacznie niższe niż w przypadku zastosowania cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R, to jednak zaobserwować można większą efektywność zastosowania domieszki przyspieszającej twardnienie (betony P2X i P6X) oraz obniżenia stosunku w/c (betony P2W i P6W), co skutkowało wzrostem wytrzymałości na ściskanie o ok 50% względem betonów P2 oraz P6 (tabela 54). Najbardziej efektywną metodą podniesienia wytrzymałości wczesnej betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych okazało się zastosowanie podwyższonej temperatury dojrzewania (60°C) wraz z obniżeniem stosunku w/c. Po 18 godzinach wytrzymałości na ściskanie betonów wykonanych z użyciem cementów niskoemisyjnych dojrzewających w podwyższonej temperaturze przekraczały 20 MPa, poziom który jest często przyjmowany jako minimalna wytrzymałość rozformowania elementów prefabrykowanych do transportu. Wytrzymałość powyżej 20 MPa osiągnął również beton z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-LL) po 24 godzinach dojrzewania z zastosowaniem domieszki przyspieszającej twardnienie (P2X) oraz beton z obniżonym stosunkiem w/c=0,35 (P2W). Zastosowanie domieszki przyspieszającej wiązanie poprawiło wytrzymałość wczesną betonów (do 2 dni dojrzewania), natomiast po 28 dniach dojrzewania uzyskiwane poziomy wytrzymałości na ściskanie były niższe o ok. 2-3 MPa od betonów bez domieszki przyspieszającej twardnienie. Po 90 dniach dojrzewania uzyskiwane poziomy wytrzymałości były zbliżone. Wyniki badań głębokości penetracji wody pod ciśnieniem betonów przeznaczonych do prefabrykacji przedstawiono w tabeli 55.

Tabela 55. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem betonów przeznaczonych do prefabrykacji

Rodzaj cementu		Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem [mm]								
		CEM I 52,5 R			CEM II/C-M (S-LL)			CEM VI (S-V)		
Oznaczenie betonu		P1	P1X	P1W	P2	P2X	P2W	P6	P6X	P6W
Okres dojrzewania [dni]	28	17	18	10	21	23	19	23	22	18
	90	15	16	9	13	16	8	14	17	10

Betony charakteryzowały się bardzo wysoką szczelnością. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem nie przekraczała 25 mm. Wpływ zastosowania domieszki przyspieszającej twardnienie na szczelność betonu był pomijalny. Zastosowanie obniżonego stosunku w/c spowodowało niewielki wzrost szczelności betonu. Betony z użyciem cementów niskoemisyjnych charakteryzowały się znacznym doszczelnieniem struktury betonu w okresie między 28 a 90-dniem dojrzewania, efektem czego był spadek głębokości penetracji wody (tabela 55).

4.5.3. Beton wysokowytrzymałościowy

Zastosowanie betonu wysokowytrzymałościowego (BWW) stwarza szerokie możliwości w zakresie projektowania architektonicznego oraz konstrukcyjnego, co odpowiada rosnącym wymaganiom współczesnego budownictwa. Poziom wytrzymałości oraz wysoka szczelność betonów wysokowytrzymałościowych pozwala na formowanie smuklejszych i lżejszych konstrukcji przy uzyskaniu estetycznej powierzchni betonu. Betony wysokowytrzymałościowe charakteryzują się również wysoką trwałością, co jest szczególnie ważne dla zrównoważonego wykorzystania surowców nieodnawialnych. Beton BWW charakteryzuje się zwiększoną ilością cementu w 1m^3 w porównaniu do betonów zwykłych, co skutkuje zwiększonym poziomem emisji CO_2 przypadającym na wyprodukowanie 1m^3 betonu. Poziom emisji CO_2 jest szczególnie wysoki w przypadku stosowania cementów portlandzkich CEM I oraz cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A i B (najczęściej stosowane cementy w składzie betonu wysokowytrzymałościowego). W ramach rozprawy przeanalizowano możliwości zastosowania cementów niskoemisyjnych w składzie betonu wysokowytrzymałościowego (BWW). Przyjęty skład oraz oznaczenia betonów wysokowytrzymałościowych BWW przedstawiono w tabeli 56.

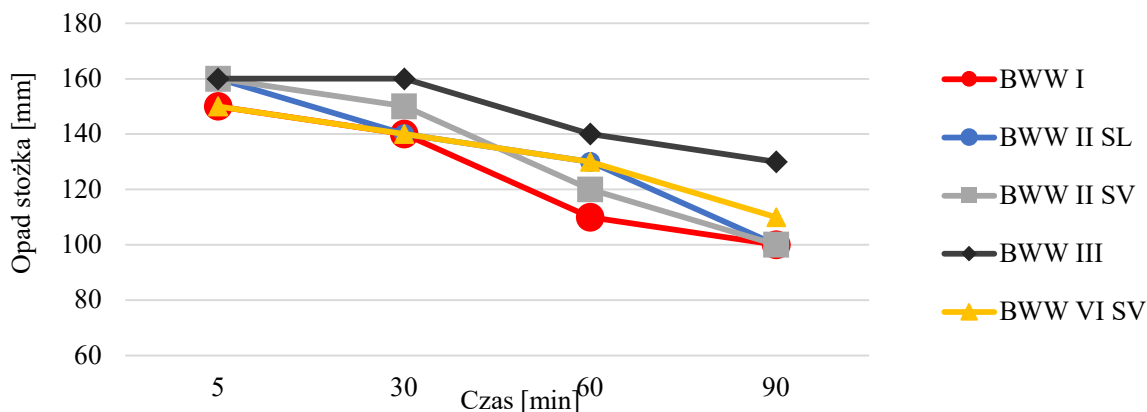
Tabela 56. Skład oraz oznaczenia betonów wysokowytrzymałościowych BWW

Składniki betonu	Jednostka	Oznaczenie betonu:				
		BWW I	BWW II SL	BWW II SV	BWW III	BWW VI SV
Rodzaj cementu	-	CEM I 42,5 R	CEM II/C-M (S-LL)	CEM II/C-M (S-V)	CEM III/A 42,5N LH/HSR/A	CEM VI (S-V)
Ilość cementu	kg/m ³	480				
Woda	kg/m ³	168				
Piasek 0-2 mm	kg/m ³	631	631	624	629	623
Bazalt 2/8 mm	kg/m ³	547	547	538	545	538
Bazalt 8/16 mm	kg/m ³	681	681	672	679	671
Superplastyfikator MasterEase 3040	% m.c.	0,80	0,85	0,80	0,80	0,80
Plastyfikator MasterPozolith 18 BVC	% m.c.	0,3				
Pył krzemionkowy	kg/m ³	30				
Projektowana zawartość powietrza	% obj.	≤ 3,0				
w/c	-	0,36				
Projektowana klasa konsystencji	-	S3				

Zastosowanie efektywnych domieszek w postaci superplastyfikatora oraz plastyfikatora pozwoliło na uzyskanie oraz utrzymanie w czasie 90 minut konsystencji w projektowanej klasie S3 (tab.57, rys.56). Zwiększonego dozowania superplastyfikatora wymagał beton oznaczony BWW II SL z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-LL) (tab.57). Zawartość powietrza oraz gęstość mieszanek betonowych BWW zbadano przed zaformowaniem próbek do badań tj. po 90 minutach od pierwszego kontaktu wody z cementem. Zawartość powietrza w mieszankach betonowych wynosiła od 2,2 do 2,8 % objętości (tabela 57).

Tabela 57. Właściwości mieszanek betonowych BWW

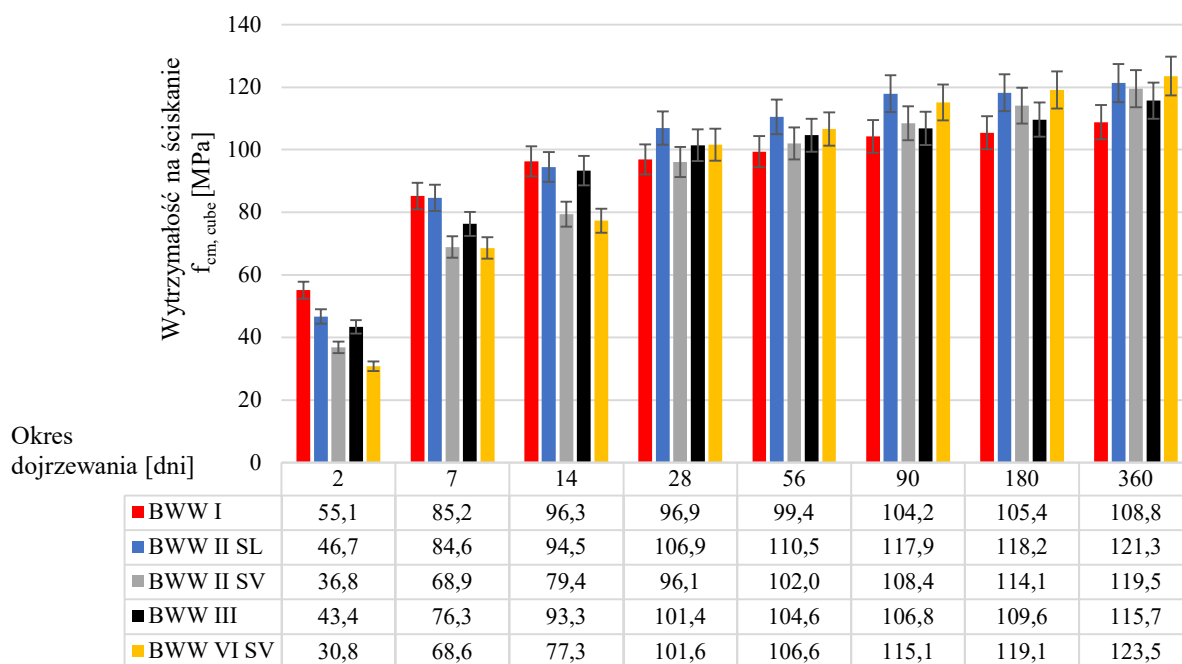
Oznaczenie betonu	Rodzaj cementu	Opad stożka [mm]				Zawartość powietrza [% obj.]	Gęstość [kg/m ³]
		5 min	30 min	60min	90 min		
BWW I	CEM I 42,5 R	150	140	110	100	2,3	2504
BWW II SL	CEM II/C-M (S-LL)	160	140	130	100	2,2	2523
BWW II SV	CEM II/C-M (S-V)	160	150	120	100	2,8	2470
BWW III	CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	160	160	140	130	2,4	2498
BWW VI SV	CEM VI (S-V)	150	140	130	110	2,5	2475



Rys. 56. Zmiana konsystencji mieszanek betonowych BWW

Betony wysokowytrzymałościowe BWW z użyciem cementów niskoemisyjnych charakteryzowały się zbliżonym utrzymaniem konsystencji w czasie 90 minut w porównaniu do betonu z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R (BWW I) (rys. 56). Najmniejszym spadkiem konsystencji charakteryzowała się mieszanka betonowa z użyciem cementu hutniczego CEM III/A 42,5N (oznaczona jako BWW III).

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonów wysokowytrzymałościowych BWW przedstawiono na rysunku 57 (wyniki stanowią średnią z sześciu próbek). Betony w klasie wytrzymałości na ściskanie powyżej C50/60 zgodnie z powszechnie przyjętą klasyfikacją uważa się za betony o wysokiej wytrzymałości. Dla wszystkich badanych betonów średnia wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach dojrzewania przewyższała poziom 60 MPa. Betony z użyciem cementów niskoemisyjnych charakteryzowały się niższym przyrostem wytrzymałości na ściskanie we wczesnym okresie dojrzewania tj. po 2 i 7-dniach w porównaniu do betonu z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R (BWW I). Należy zaznaczyć, że wytrzymałości na ściskanie dla betonów: BWW II SL z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-LL) oraz betonu BWW I z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R po 7 oraz 14-dniach dojrzewania były zbliżone (rys.57). W okresie do 14 dni dojrzewania beton BWW III z użyciem cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA charakteryzował się wyższą wytrzymałością na ściskanie niż betony BWW II SV i BWW VI SV z użyciem cementów popiołowo-żużłowych. Po 28 dniach dojrzewania wytrzymałości na ściskanie betonów wynosiły ok. 100 MPa. W okresach dojrzewania dłuższych niż 28 dni betony z użyciem cementów niskoemisyjnych charakteryzowały się wyższym poziomem wytrzymałości na ściskanie niż beton z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R (BWW I). W okresach dojrzewania dłuższych niż 56 dni wytrzymałość na ściskanie betonów z cementami żużłowo-popiołowymi CEM II/C-M (S-V) i CEM VI (S-V), a także cementem żużłowo-wapiennym CEM II/C-M (S-LL) przewyższała poziom wytrzymałości na ściskanie betonów z cementem hutniczym CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA. Po 360-dniach dojrzewania wytrzymałość na ściskanie betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych wynosiła ok. 120 MPa.



Rys. 57. Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm, cube}$ betonów wysokowytrzymałościowych *BWW*

Odpowiednio ukształtowany skład betonów BWW skutkowało uzyskaniem wysokich wytrzymałości na ściskanie, ale także uzyskaniem bardzo szczelnej struktury betonu. Wysoka szczelność zapobiega wnikaniu czynników korozyjnych w głąb struktury betonu, czego efektem jest wysoka trwałość. Wyniki badań głębokości penetracji wody pod ciśnieniem (PN-EN 12390-8:2019-08 [92]) przedstawiono w tabeli 58. Wszystkie betony BWW charakteryzowały się wysoką szczelnością już po 28 dniach dojrzewania (głębokość penetracji wody pod ciśnieniem < 30mm). Betony wykonane z użyciem cementów niskoemisyjnych charakteryzowały się znacznym doszczelnieniem struktury w okresie pomiędzy 28 a 90-dniem dojrzewania (głębokość penetracji wody pod ciśnieniem < 12mm). Jest to efektem zwiększonego stopnia hydratacji cementów z wysoką zawartością składników głównych innych niż klinkier portlandzki. W tabeli 58 przedstawiono również wyniki badań modułu sprężystości betonu E_{cm} (moduł Younga) wg normy PN-EN 12390-13:2012-02 [150]. Uzyskane wyniki odpowiadają w przybliżeniu poziomom normowym. Zauważyć można wzrost sztywności betonu pomiędzy 28 a 90 dniem dojrzewania, nie stwierdzono istotnego wpływu rodzaju zastosowanego cementu na uzyskiwane wielkości modułu sprężystości betonu E_{cm} .

Tabele 58. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem oraz moduł sprężystości E_{cm} betonów BWW

Właściwość		Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem [mm]		Moduł sprężystości E_{cm} [GPa]	
		wg PN-EN 12390-8:2019-08 [92]		wg PN-EN 12390-13:2012-02 [150]	
Okres dojrzewania [dni]		28	90	28	90
Oznaczenie betonu	BWW I	14	12	32,2	36,7
	BWW II SL	14	11	33,1	38,2
	BWW II SV	17	7	29,8	36,3
	BWW III	15	10	30,3	35,9
	BWW VI SV	21	9	28,4	38,0

Zgodnie z zapisami normy PN-EN 206 [95] aplikacja betonu w klasach ekspozycji związanych z korozją mrozową tj. XF2÷XF4 wymaga wprowadzenia napowietrzenia mieszanki betonowej, co skutkuje spadkiem wytrzymałości na ściskanie betonu. Badanie mrozoodporności zwykłej betonu wykonano zgodnie z metodyką zawartą w normie PN-B-06265:2018-10 [103]. Badanie wykonuje się na dwunastu próbkach sześciennych o długości boku 100 mm. W czasie od rozformowania próbek do dnia rozpoczęcia badania próbki przechowuje się w temp. $18\pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powyżej 90%. Nie należy przechowywać próbek betonu w wodzie. Rozpoczęcie badania polega na nasyceniu próbek wodą do stałej masy, czas nasycania nie powinien być krótszy niż 7 dni. Sześć próbek porównawczych pozostawia się w wodzie, natomiast sześć próbek przeznaczonych do zamrażania, po wytarciu i zważeniu z dokładnością do 0,2%, umieszcza się w komorze zamrażalniczej i poddaje cyklom naprzemiennego zamrażania i rozmrażania. Zamrażanie powinno odbywać się w temperaturze $-18\pm 2^{\circ}\text{C}$, minimalny czas zamrażania to 4 godziny, natomiast czas rozmrażania powinien wynosić od 2 do 4 godzin. Ilość cykli odpowiada badanemu stopniu mrozoodporności. Po zakończeniu cykli zamrażania i rozmrażania próbek betonu wszystkie próbki wyciera się oraz waży z dokładnością do 0,2%, a następnie bada ich wytrzymałość na ściskanie. Ocenie podlega średni ubytek masy próbki ΔmF obliczany wg wzoru:

$$\Delta mF = \frac{mF1 - mF2}{mF1} \times 100$$

gdzie:

mF1 – średnia masa próbek przed ich pierwszym zamrożeniem, w stanie nasycenia wodą [kg];

mF2 – średnia masa próbek po ich ostatnim zamrożeniu, w stanie nasycenia wodą [kg].

Ocenie podlega również średni spadek wytrzymałości na ściskanie próbek ΔfF obliczany wg wzoru:

$$\Delta fF = \frac{fF1 - fF2}{fF1} \times 100$$

gdzie:

fF1 – średnia wytrzymałość na ściskanie próbek porównawczych, niezamrażanych nasyconych wodą [N/mm^2];

fF2 – średnia wytrzymałość na ściskanie próbek badanych, po ich ostatnim rozmrożeniu, nasyconych wodą [N/mm²].

Kryteria zgodności dla danego stopnia mrozoodporności podano w tabeli 59. Badania wykonano za pomocą automatycznej komory zamrażalniczej (rys. 58).



Rys. 58. Automatyczna komora zamrażalnicza do badania mrozoodporności betonu

W tabeli 59 przedstawiono wyniki badań mrozoodporności zwykłej dla stopnia mrozoodporności F150. Wszystkie badane betony spełniły kryteria dla stopnia mrozoodporności F150 po 28 oraz 90 dniach dojrzewania. W przypadku badanych betonów wysokowytrzymałościowych BWW mrozoodporność zwykła w stopniu F150 została zapewniona poprzez wysoką szczelność betonu, która praktycznie uniemożliwiła wnikanie wody w głąb struktury betonu. Nie zaobserwowano znaczących różnic w wynikach badań mrozoodporności zwykłej w stopniu F150 pomiędzy betonami z użyciem cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C-M (S-LL) i CEM II/C-M (S-V) oraz cementem wieloskładnikowym CEM VI (S-V), a betonami z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R oraz cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA.

Tabela 59. Wyniki badań mrozoodporności zwykłej F150 betonów wysokowytrzymałościowych BWW

Oznaczenie betonu	Mrozoodporność zwykła F150					Wymagania zgodnie z PN-B06265 [15]
	Okres dojrzewania	Średni spadek masy Δm_F	Średnia wytrzymałość próbek porównawczych f_{F1}	Średnia wytrzymałość próbek mrożonych f_{F2}	Średni spadek wytrzymałości Δf_F	
	[dni]	[%]	[MPa]		[%]	
BWW I	28	0,21	92,1	89,9	2,39	próbki nie wykazują pęknięć $\Delta m_F \leq 5$ $\Delta f_F \leq 20$
	90	0,19	96,1	94,2	1,98	
BWW II SL	28	0,22	94,4	92,2	2,33	
	90	0,19	102,1	99,9	2,15	
BWW II SV	28	0,37	98,9	95,4	3,54	
	90	0,29	105,1	102,9	2,09	
BWW III	28	0,18	91,6	89,6	2,18	
	90	0,15	100,3	98,3	1,99	
BWW VI SV	28	0,15	103,0	101,8	1,17	
	90	0,13	110,6	109,4	1,08	

Uzyskane wyniki badań pokazują, iż cementy niskoemisyjne mogą być stosowane w składzie betonu wysokowytrzymałościowego BWW. W okresie dojrzewania dłuższym niż 28 dni betony z zastosowaniem cementów niskoemisyjnych charakteryzowały się wyższą wytrzymałością na ściskanie niż beton wykonany z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R, a także charakteryzowały się wysoką szczelnością (wzrost trwałości). Wysoka szczelność oraz poziom wytrzymałości betonów BWW zapewnił uzyskanie odpowiedniej mrozoodporności betonu (stopień F150) już po 28. dniach dojrzewania, pomimo braku zastosowania domieszki napowietrzającej.

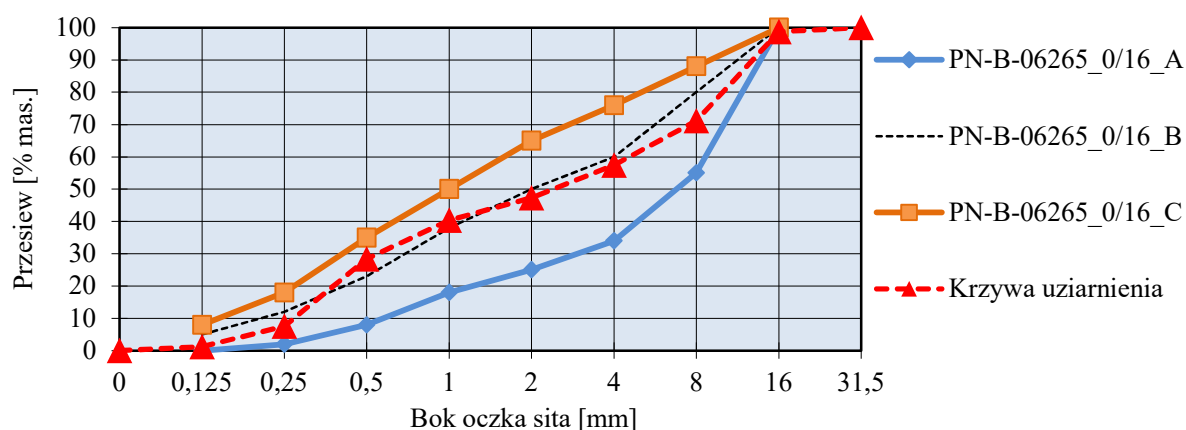
4.5.4. Beton samozagęszczalny

Współczesne budownictwo coraz częściej sięga po technologię betonu samozagęszczalnego SCC, która rozwinęła się w ostatnich kilkunastu latach. Wynika to z szeregu zalet stosowania betonu samozagęszczalnego SCC. Podstawowa korzyść, wynika z eliminacji procesu zagęszczania betonu oraz niesie za sobą również pozytywne efekty środowiskowe. Zaliczyć do nich można: zmniejszenie poziomu hałasu na placu budowy oraz w zakładach prefabrykacji, wzrost trwałości konstrukcji dzięki podwyższonej szczelności betonu oraz wysokiej jakości wykonanie elementów bez procesu zagęszczania mechanicznego. Betony samozagęszczalne SCC charakteryzują się podwyższoną zawartością cementu w $1m^3$ w porównaniu z betonem zwykłym tej samej klasy wytrzymałości na ściskanie, co skutkuje zwiększonym poziomem emisji CO_2 do atmosfery.

W ramach badań własnych rozprawy przeanalizowano możliwość zastosowania cementów niskoemisyjnych w betonie samozagęszczalnym SCC. Składy oraz przyjęte oznaczenia badanych betonów przedstawiono w tabeli 60. Krzywą uziarnienia stosu okruszowego kruszywa przedstawiono na rysunku 59.

Tabela 60. Skład oraz oznaczenia betonów samozagęszczalnych SCC

Składniki betonu	Jednos- -tka	Oznaczenia betonu				
		SCC I	SCC II SL	SCC II SV	SCC III	SCC VI SV
Rodzaj cementu	-	CEM I 42,5 R	CEM II/C-M (S-LL)	CEM II/C-M (S-V)	CEM III/A 42,5N LH/HSR/A	CEM VI (S-V)
Ilość cementu	kg/m ³	380				
Woda	kg/m ³	175				
Popiół lotny krzemionkowy (V)	kg/m ³	120				
Piasek 0-2 mm	kg/m ³	773	773	765	769	764
Żwir 2/8 mm	kg/m ³	408	408	403	407	403
Żwir 8/16 mm	kg/m ³	466	466	461	465	460
Superplastyfikator MasterEase 3040	% m.c.	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1
Projektowana zawartość powietrza	% obj.	≤ 3,0				
Stosunek w/c	-	0,47				
Projektowana klasa konsystencji	-	SF2				



Rys. 59. Krzywa uziarnienia stosu okruszowego kruszywa dla betonów samozagęszczalnych SCC

Na rysunku 60 przedstawiono metody badań właściwości mieszanek samozagęszczalnych. Natomiast w tabeli 61 przedstawiono kryteria oceny właściwości samozagęszczalnych mieszanek betonowych zgodne z PN-EN 206 [95]. Konsystencję oznaczono metodą rozplywu stożka wg normy PN-EN 12350-8:2012 [142] po 5, 30, 60, 90-minutach od pierwszego kontaktu wody z cementem, natomiast właściwości dodatkowe tj. lepkość oraz przepływalność, a także zawartość powietrza oraz gęstość mieszanki betonowej, wykonano bezpośrednio przed zaformowaniem próbek do badań tj. po 90 minutach od momentu wymieszania składników. Właściwości mieszanek betonowych samozagęszczalnych przedstawiono w tabeli 62.

Tabela 61. Klasy konsystencji oraz właściwości betonów samozagęszczalnych SCC wg PN-EN 206 [95]

Konsystencja mieszanek betonowej SCC	Metoda pomiaru rozplywu stożka [142]	
	Klasa	Wartości graniczne [mm]
	SF1	550-650
	SF2	660-750
	SF3	760-850
Przeplywalności mieszanek betonowej	Metoda L-pojemnika [143]	
	Klasa	Wskaźnik przeplywalności [-]
	PL1	≥ 0,8 dla 2 prętów
	PL2	≥ 0,8 dla 3 prętów
	Metoda J- pierścienia [145]	
	Klasa	Wskaźnik przeplywalności [mm]
	PJ1	≤ 10,0 z 12 prętami
PJ2	≤ 10,0 z 16 prętami	
Lepkość mieszanek betonowej	Metoda pomiaru czasu V-lejka ¹⁾ [144]	
	Klasa	Wartości graniczne [s]
	VF1	< 9,0
	VF2	9,0-25,0
	Metoda pomiaru czasu t ₅₀₀ ²⁾ [142]	
	Klasa	Wartości graniczne [s]
	VS1	< 2,0
VS2	≥ 2,0	

- 1) Klasyfikacji nie stosuje się do betonu z kruszywem o D_{max} większym niż 22,4mm
 2) Klasyfikacji nie stosuje się do betonu z kruszywem o D_{max} większym niż 40mm



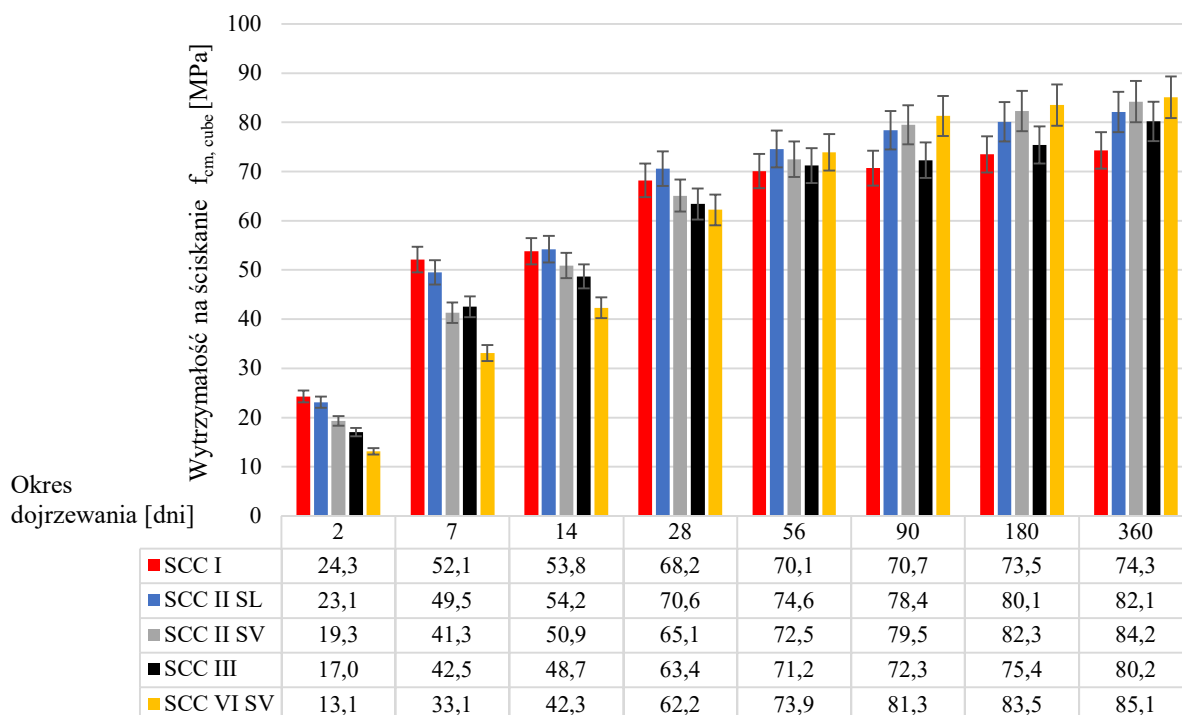
Rys. 60. Metodyka badań właściwości mieszanek betonowych samozagęszczalnych SCC: A) konsystencja metodą rozplywu stożka (PN-EN 12350-8:2012 [142]); B) przeplywalność metodą L-pojemnika - 3 pręty (PN-EN 12350-10:2012 [143]); C) lepkość metodą V-lejka (PN-EN 12350-9:2012 [144]); D) lepkość metodą J-pierścienia - 16 prętów (PN-EN 12350-12:2012 [145])

Tabela. 62. Właściwości mieszanek betonowych SCC

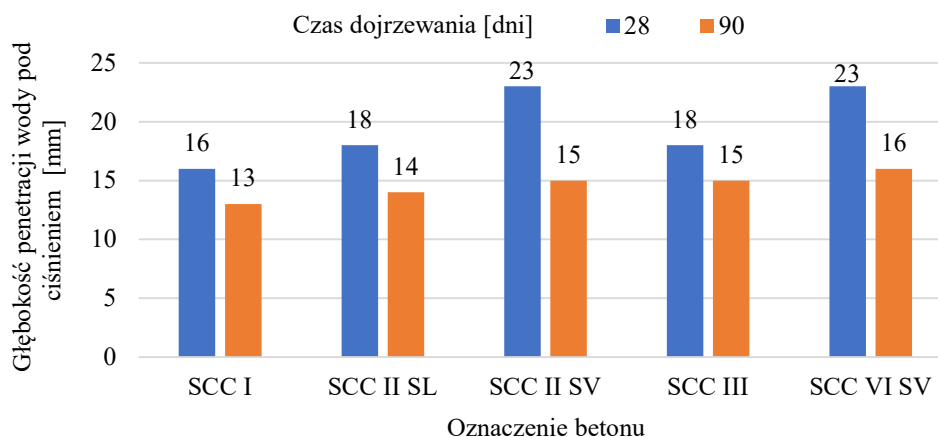
Oznaczenie betonu	Rozpływ stożka [mm]				V-lejek [s]	L-pojemnik [-] (3 pręty)	J-pierścień [mm] (16 prętów)	Zawartość powietrza [% obj.]	Gęstość [kg/m ³]
	5 min	30 min	60 min	90 min					
SCC I	720	690	660	650	6,5	0,89	8	2,4	2291
SCC II SL	690	680	670	650	7,5	0,85	9	2,7	2254
SCC II SV	730	710	690	660	5,5	0,96	6	2,3	2281
SCC III	730	700	690	660	5,0	0,92	6	2,1	2279
SCC VI SV	710	690	680	670	4,5	0,95	5	1,9	2298

Wyniki pomiaru konsystencji mieszanek betonowych SCC świadczą o spełnieniu zakładanej klasy konsystencji tj. SF2 w czasie 90 minut. Wyniki rozptywu stożka były zbliżone dla wszystkich badanych mieszanek samozagęszczalnych. Największym rozptywem stożka, po 90 minutach, charakteryzował się beton z użyciem cementu wieloskładnikowego CEM VI (S-V) (tabela 62). Ocena właściwości dodatkowych mieszanek SCC pozwala zaklasyfikować badane mieszanki do klas: VF1 (wg metody V-lejka); PL2 (wg metody L-pojemnika) oraz PJ2 (wg metody J-pierścienia). Zauważyć można pozytywny wpływ cementów popiołowo-żużlowych (betony SCC II SV oraz beton SCC VI SV) oraz cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA (beton SCC III) na właściwości reologiczne samozagęszczalnej mieszanki betonowej (obniżona lepkość oraz lepsza przepływalność). Beton SCC II SL z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-LL) charakteryzował się podwyższoną lepkością oraz mniejszą zdolnością do przepływu niż beton z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R (tabela 62).

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonów samozagęszczalnych przedstawiono na rys. 61. Rysunek 62 przedstawia wyniki badań głębokości penetracji wody pod ciśnieniem (PN-EN 12390-8:2019-08 [92]) betonów samozagęszczalnych.



Rys. 61. Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm, cube}$ betonów samozagęszczalnych SCC



Rys. 62. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem betonów samozagęszczalnych SCC

Betony z użyciem cementów niskoemisyjnych charakteryzowały się obniżoną dynamiką przyrostu wytrzymałości na ściskanie w pierwszych 28. dniach dojrzewania w porównaniu z betonem wykonanym z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Należy zaznaczyć, że betony z użyciem cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C-M (S-LL) i CEM II/C-M (S-V) charakteryzowały się wyższą wytrzymałością na ściskanie niż beton z użyciem cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA. Wyjątek stanowi wytrzymałość po 7 dniach dojrzewania, która dla betonów SCC III z użyciem cementu hutniczego CEM III/A 42,5N

LH/HSR/NA oraz SCC II SV z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-V) była zbliżona. W dłuższych okresach dojrzewania (56 dni i 90 dni) betony z użyciem cementów niskoemisyjnych charakteryzowały się wyższym poziomem wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z betonem referencyjnym (SCC I), który po 360 dniach dojrzewania uzyskał wytrzymałość na ściskanie ok. 80 MPa (rys. 61). Cechą charakterystyczną betonów samozagęszczalnych jest wysoka szczelność, szczególnie po 90 dniach dojrzewania (rys.62).

Uzyskane wyniki badań świadczą, iż cementy niskoemisyjne mogą być z powodzeniem stosowane w składzie betonów samozagęszczalnych.

4.5.5. Beton masywny

Niskie ciepło hydratacji, wydłużony czas początku wiązania, wolny przyrost wytrzymałości wczesnej cementów niskoemisyjnych skłaniają do stosowania ich w składzie betonu masywnego. W ramach rozprawy porównano właściwości 4 betonów masywnych z użyciem cementów niskoemisyjnych. Jako cement referencyjny zastosowano cementu hutniczy CEM III/A 42,5N LH/HSR/A – powszechnie stosowany cement w składzie betonu masywnego [84]. Skład mieszanek betonowych oraz przyjęte oznaczenia betonów przedstawiono w tabeli 63. W celu poprawy właściwości reologicznych mieszanek betonowych i zoptymalizowania ilość cementu (obniżenia ciepła hydratacji) zastosowano popiół lotny w charakterze dodatku typu II.

Tabela 63. Skład mieszanek betonowych oraz oznaczenia betonów masywnych

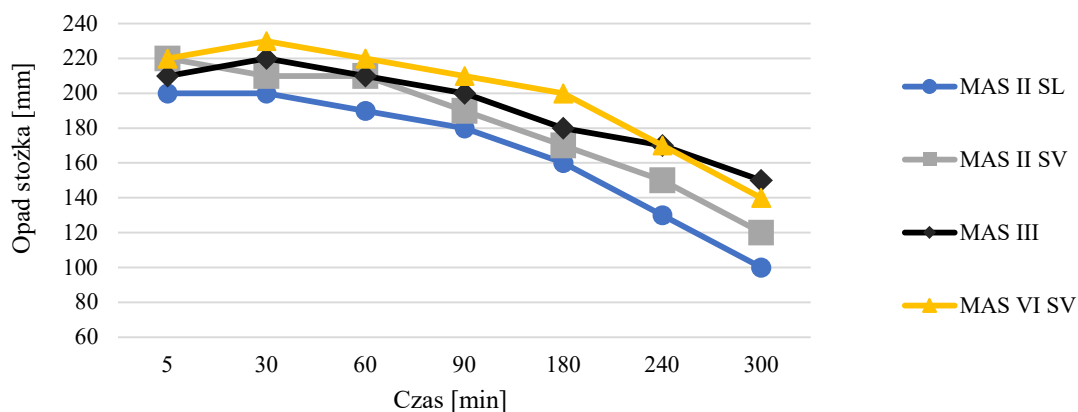
Składniki betonu	Jednostka	Oznaczenie betonu			
		MAS II SL	MAS II SV	MAS III	MAS VI SV
Rodzaj cementu	-	CEM II/C-M (S-LL)	CEM II/C-M (S-V)	CEM III/A 42,5N LH/HSR/A	CEM VI (S-V)
Ilość cementu	kg/m ³	230			
Woda	kg/m ³	166			
Piasek 0-2 mm	kg/m ³	602	599	601	598
Żwir 2/8 mm	kg/m ³	349	347	348	347
Żwir 8/16 mm	kg/m ³	381	378	380	378
Żwir 16/31,5 mm	kg/m ³	436	433	435	433
Popiół lotny krzemionkowy	kg/m ³	100			
Superplastyfikator MasterGlenium Sky 686	% m.c.	1,32	1,28	1,28	1,32
Plastyfikator MasterPozolith 18 BVC	% m.c.	1,0			
Domieszka opóźniająca wiązanie MasterSet R 433	% m.c.	0,3			
Projektowana zawartość powietrza	% obj.	2,0			
Stosunek w/c	-	0,72			
Stosunek w/s (s = c+0,4 x p)	-	0,50			
Projektowana klasa konsystencji	-	S3 po 300 minutach			

W celu uzyskania zakładanej klasy konsystencji mieszanki betonowej tj. S3 po 300 minutach (pożądany czas ze względu na warunki zabudowy) od wymieszania składników z wodą,

w przypadku mieszanek betonowych z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-LL) oraz cementu wieloskładnikowego CEM VI (S-V), zwiększono dozowanie superplastyfikatora (tabela 63). Właściwości mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 64 oraz na rys. 63. Zawartość powietrza w betonach, oznaczona po 300 minutach od momentu wymieszania składników, wahała się od 2,4 do 2,9 % objętości (tabela 64).

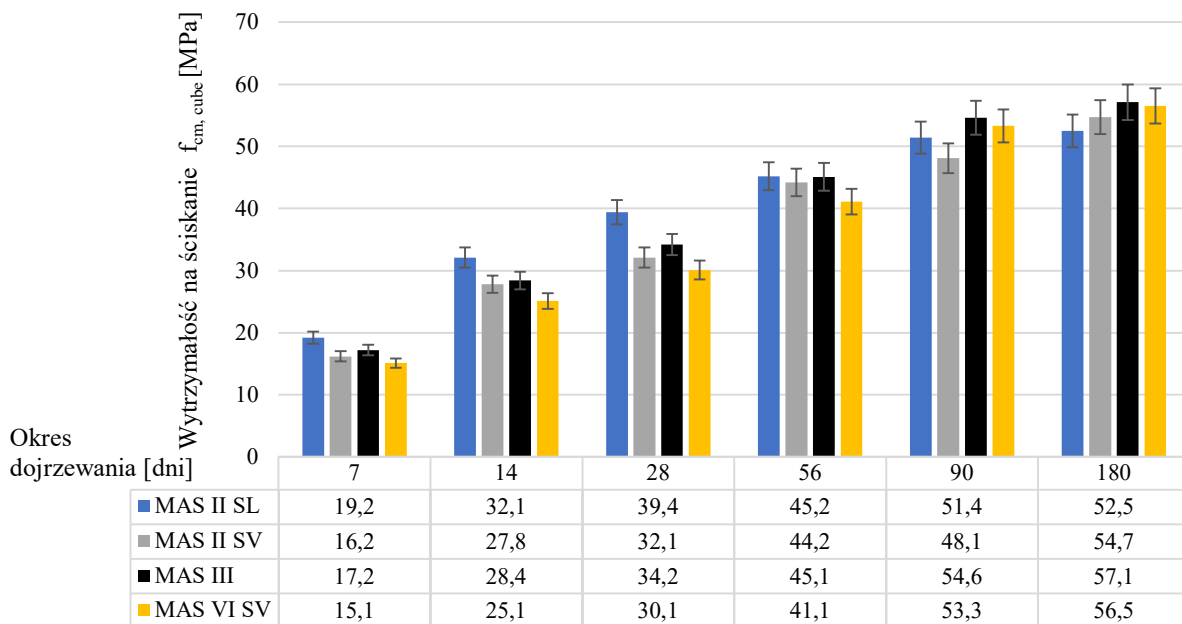
Tabela 64. Właściwości mieszanek betonowych - beton masywny

Oznaczenie betonu	Rodzaj cementu	Opad stożka [mm]							Zawartość powietrza [% obj.]	Gęstość [kg/m ³]
		5 min	30 min	60 min	120 min	180 min	240 min	300 min		
MAS II SL	CEM II/C-M (S-LL)	200	200	190	180	160	130	100	2,4	2314
MAS II SV	CEM II/C-M (S-V)	220	210	210	190	170	150	120	2,5	2307
MAS III	CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	210	220	210	200	180	170	150	2,9	2295
MAS VI SV	CEM VI (S-V)	220	230	220	210	200	170	140	2,4	2309

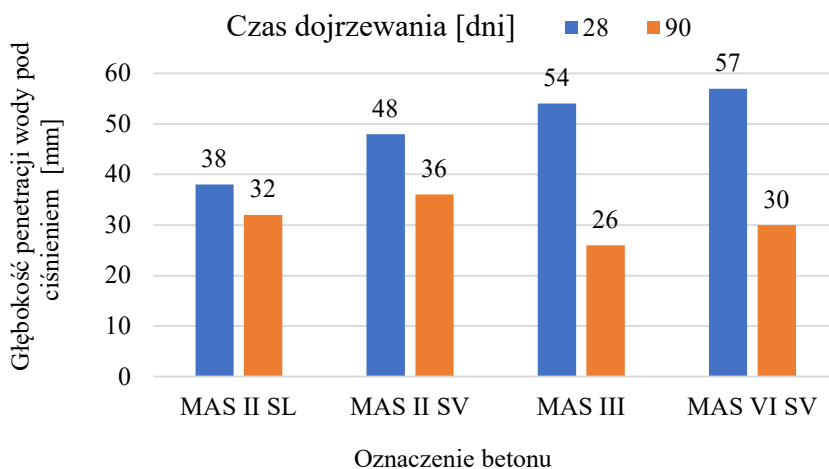


Rys.63. Konsystencja mieszanek betonowych - beton masywny

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonów przedstawiono na rysunku 64, natomiast wyniki badań głębokości penetracji wody pod ciśnieniem przedstawiono na rysunku 65.



Rys. 64. Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm, cube}$ betonów masywnych

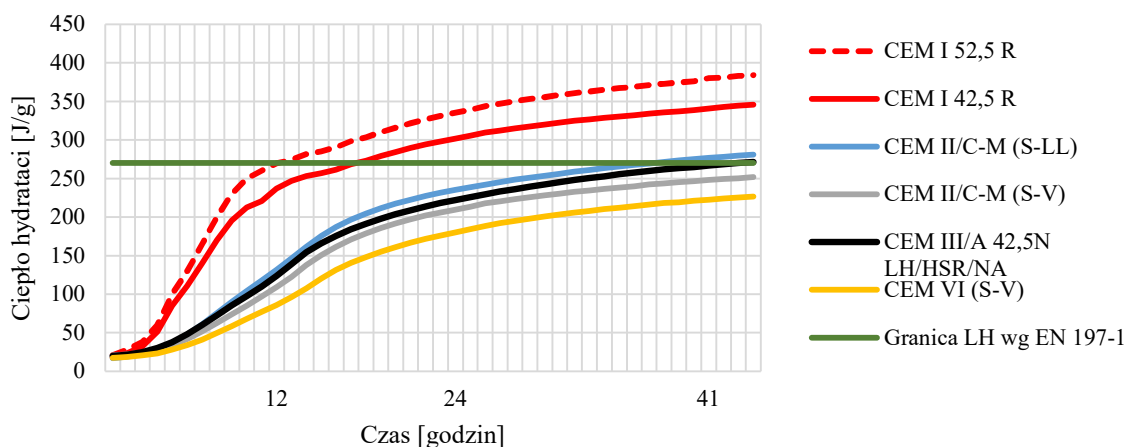


Rys. 65. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem betonów masywnych

Rozwój wytrzymałości na ściskanie betonów niskoemisyjnych przebiegał w sposób zbliżony do cementu hutniczego CEM III/A 42,5 N (spoiwa powszechnie stosowanego w składzie betonu masywnego). Podwyższoną dynamikę przyrostu wytrzymałości na ściskanie w pierwszych 28 dniach dojrzewania charakteryzował się beton z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-LL). Betony masywne charakteryzowały się znacznym przyrostem wytrzymałości na ściskanie w okresie pomiędzy 28 a 90-dniem dojrzewania (wzrost wytrzymałość z poziomu około 30 MPa do około 50 MPa, rys. 64). Fakt ten należy wykorzystać

przy optymalizacji składu mieszanki betonu masywnego (korekta zawartości cementu i/lub zastosowanie większej ilości dodatku typu II w postaci popiołu lotnego).

Jako efekt aktywności pucolanowej popiołu lotnego krzemionkowego (V) oraz utajonych właściwości hydraulicznych zmielonego granulowanego żużla wielkopieczowego (S), po 90 dniach dojrzewania, zaobserwowano znaczny wzrost szczelności badanych betonów masywnych (rys. 65).



Rys. 66. Ciepło hydratacji cementów

Uzyskane wyniki badań cementów niskoemisyjnych przedstawione w punkcie 4.2.1, głównie w zakresie wydzielania ciepła hydratacji (rys. 66), a także wydłużony czas początku wiązania oraz wyniki badań betonów świadczą o szerokich możliwościach zastosowania cementów niskoemisyjnych w wykonawstwie konstrukcji i obiektów betonowych masywnych.

4.6. Aspekty ekologiczne związane ze stosowaniem cementów niskoemisyjnych

W ramach oceny ekologicznej przeanalizowano poziom emisji CO₂ związany z produkcją cementów niskoemisyjnych oraz betonów z ich użyciem. Zwrócono także uwagę na poziom radioaktywności cementów wieloskładnikowych zawierające uboczne produkty przemysłowe po obróbce termicznej, takie jak: zmielony żużel wielkopieczowy (S) i/lub popiół lotny krzemionkowy (V). Nie rozpatrywano problematyki związanej z obecnością metali ciężkich w składzie ubocznych produktów przemysłowych. Problematyka ta jest szeroko omawiana, a w kraju kompleksowo została omówiona w monografii [54].

4.6.1. Radioaktywność cementów wieloskładnikowych

W tabeli 65 przedstawiono wyniki badań stężeń promieniotwórczych izotopów: potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-232 oraz wyznaczone na ich podstawie wskaźniki stężenia promieniotwórczego I wybranych cementów powszechnego użytku. Badania wykonano zgodnie z instrukcją ITB 455/2010 [152] za pomocą miernika promieniotwórczości naturalnej typu MAZAR-01.

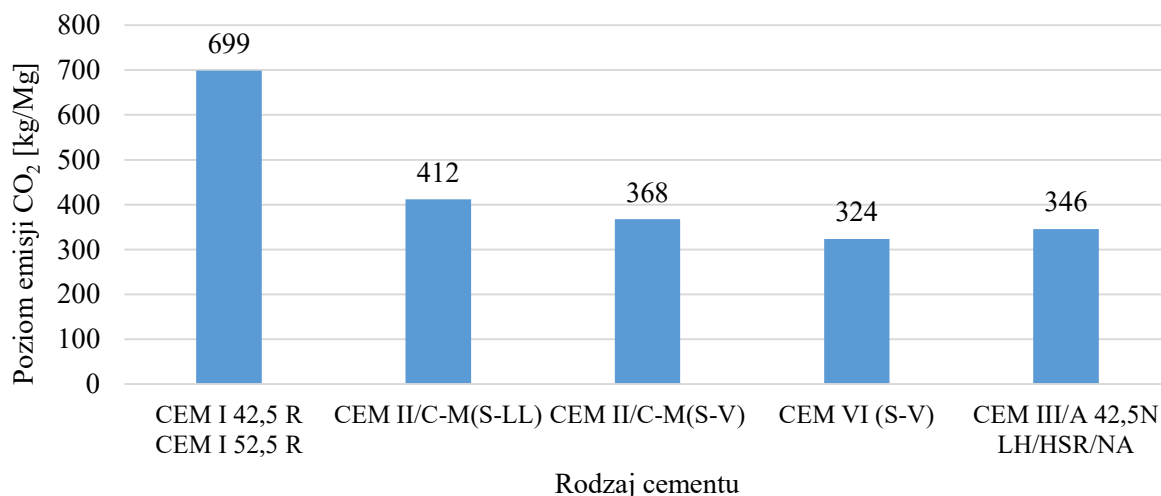
Tabela 65. Wskaźnik promieniotwórczości dla wybranych cementów powszechnego użytku

L.p.	Przedmiot badań	Wskaźnik stężenia promieniotwórczego I [-]	Stężenie aktywności radionuklidu : Th-232 [Bq/kg]	Stężenie aktywności radionuklidu : Ra-226 [Bq/kg]	Stężenie aktywności radionuklidu : K-40 [Bq/kg]	Kryterium wg [117]
			wynik badania +/- niepewność			
1	CEM I 42,5 R	0,22 +/- 0,22	15,2 +/- 2,4	25,7 +/- 4,4	163 +/- 22	I ≤ 1,0
2	CEM I 52,5 R	0,23 +/- 0,23	14,6 +/- 2,4	27,2 +/- 4,5	185 +/- 23	
3	CEM II/A-M (S-LL) 52,5N	0,25 +/- 0,25	16,3 +/- 3,4	33,3 +/- 7,4	195 +/- 34	
4	CEM II/ B-M (S-V) 42,5 N	0,38 +/- 0,38	26,7 +/- 3,2	51,9 +/- 6,3	232 +/- 29	
5	CEM II B-S 32,5 R-NA	0,29 +/- 0,29	19,6 +/- 3,3	45 +/- 7,6	141 +/- 36	
6	CEM II/ B-M (V-LL) 32,5 R	0,36 +/- 0,36	26,2 +/- 3,3	42,7 +/- 5,9	253 +/- 30	
7	CEM III/A 42,5 N LH/HSR/NA	0,36 +/- 0,36	19,9 +/- 2,9	61 +/- 6,7	170 +/- 26	
8	CEM V/A (S-V) 42,5 LH/HSR/NA	0,47 +/- 0,47	31,9 +/- 3,6	64,2 +/- 7,1	280 +/- 32	

Radioaktywność cementów wieloskładnikowych zawierających żużel wielkopiecowy oraz popiół lotny była wyższa od radioaktywności cementów portlandzkich CEM I. Najwyższym poziomem radioaktywności charakteryzował się cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 42,5 LH/HSR/NA, którego wskaźnik stężenia promieniotwórczego wynosił poniżej 0,5[-], co stanowi 50% wielkości dopuszczalnej. Zauważyć można, iż poziom radioaktywności cementów zawierających popiół lotny jest wyższy niż cementów żużlowych i portlandzkich. Wszystkie badane cementy mogą być bezpiecznie stosowane w produkcji materiałów budowlanych używanych w budynkach przeznaczonych na stały pobyt ludzi i inwentarza żywego. Reasumując poziom radioaktywności cementów niskoemisyjnych zawierających uboczne produkty przemysłowe po obróbce termicznej takie jak : zmielony żużel wielkopiecowy (S) i/lub popiół lotny krzemionkowy (V) nie stanowi zagrożenia dla środowiska, ludzi oraz zwierząt. Na uwadze należy mieć fakt, iż zawartość cementu w składzie betonu to tylko kilkanaście procent objętości, a więc nastąpi dalsze obniżenie poziomu naturalnej radioaktywności w betonie.

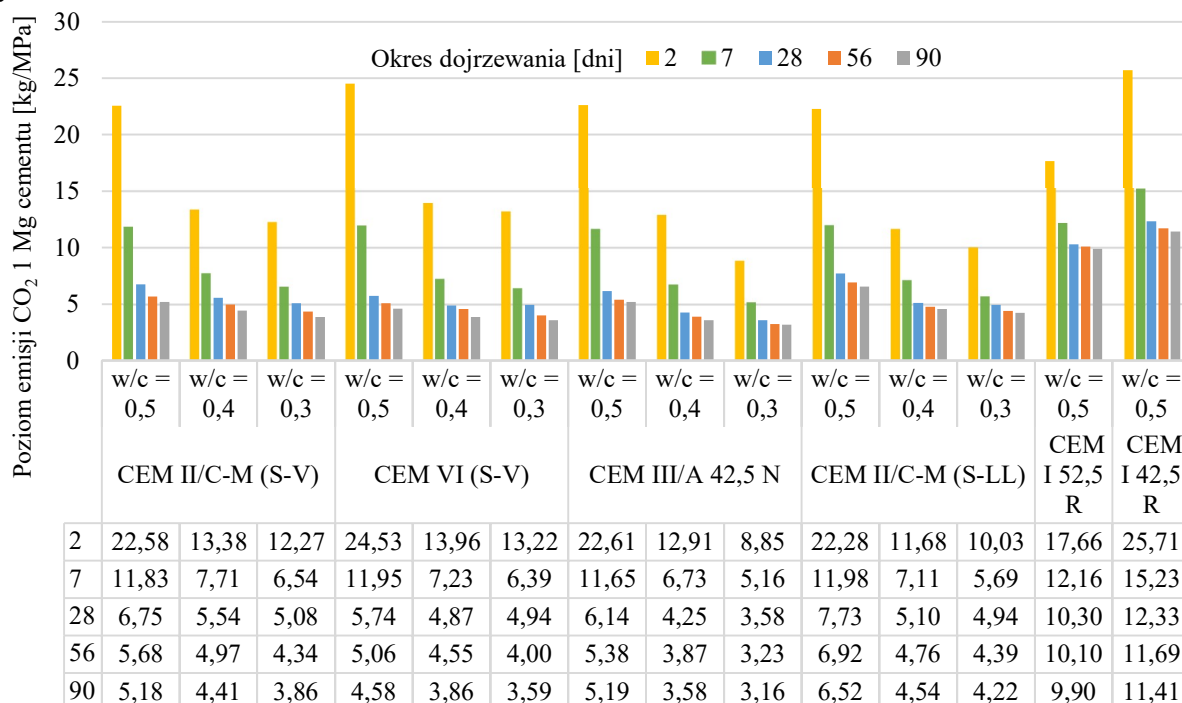
4.6.2. Emisyjność cementów wieloskładnikowych

Na podstawie znajomości poziomu emisji CO₂ przy produkcji klinkieru portlandzkiego oraz składu badanych cementów obliczono poziom emisji CO₂ przypadający na 1 Mg użytych w rozprawie cementów. Do obliczeń przyjęto poziom emisji CO₂ przy produkcji klinkieru portlandzkiego na poziomie 736 kg/Mg [43]. Wyniki przedstawiono na rysunku 66. Poziom emisji CO₂ cementów wieloskładnikowych (niskoemisyjnych) jest proporcjonalny do zawartości klinkieru portlandzkiego w składzie cementu i jest znacznie niższy w porównaniu z cementem portlandzkim CEM I (rys.66).



Rys. 66. Poziom emisji CO₂ cementów

Z uwagi na fakt, iż cementy charakteryzują się różnymi poziomami emisji CO₂ oraz różnymi poziomami wytrzymałości na ściskanie obliczono emisję przypadającą na uzyskanie wytrzymałości 1 MPa. W obliczeniach uwzględniono także poziomy wytrzymałości na ściskanie uzyskiwane przy obniżonym stosunku w/c (w/c=0,4 oraz w/c=0,3) oraz poziomy wytrzymałości uzyskiwane w dłuższych okresach dojrzewania (56 dni oraz 90 dni). Wyniki przedstawiono na rysunku 67.



Rys. 67. Wpływ stosunku wodno-cementowego oraz okresu dojrzewania na poziom emisji CO₂ przypadającą na 1 MPa wytrzymałości na ściskanie cementów

W początkowym okresie dojrzewania, po 2 dniach przy stosunku $w/c=0,5$, cement portlandzki CEM I 52,5 R charakteryzuje się najniższym poziomem emisji CO_2 na 1 MPa, co wskazuje na jego przydatność w obszarach budownictwa, w których bardzo wysoka wytrzymałość wczesna jest wymaganiem pożądanym np. prefabrykacja. Cementy wieloskładnikowe charakteryzują się, po 28 dniach dojrzewania, niższą o ok. 40÷50 % emisją CO_2 przypadającą na uzyskanie 1 MPa wytrzymałości na ściskanie niż cement portlandzki CEM I 52,5 R (rys.67). Wydłużenie czasu dojrzewania cementów wieloskładnikowych do 56 oraz 90-dni istotnie obniża ilość emisji CO_2 przypadającą na 1 MPa, w odniesieniu do cementów portlandzkich CEM I, co jest związane z wyższą dynamiką przyrostu wytrzymałości cementów wieloskładnikowych w dłuższych okresach dojrzewania. Efektywnym sposobem na obniżanie poziomu emisji CO_2 , w przeliczeniu na 1 MPa, jest również obniżanie stosunku w/c (rys.67). Wpływ wydłużenia czasu dojrzewania oraz obniżenia stosunku w/c na poziom redukcji emisji CO_2 , przypadającej na uzyskanie 1 MPa wytrzymałości na ściskanie cementów niskoemisyjnych, przedstawiono w tabeli 66.

Tabela 66. Wpływ stosunku wodno-cementowego oraz okresu dojrzewania na redukcję emisji CO_2 przypadającą na 1 MPa wytrzymałości na ściskanie cementów

Rodzaj cementu	Redukcja emisji $CO_2/1MPa$ [%]			Okres dojrzewania [dni]
	w/c = 0,5	w/c = 0,4	w/c = 0,3	
CEM II/C-M (S-LL)	0,0 ¹⁾	34,0	36,2	28
	10,6	38,5	43,2	56
	15,7	41,2	45,4	90
CEM II/C-M (S-V)	0,0 ¹⁾	30,8	41,7	28
	12,4	37,0	47,4	56
	15,5	41,7	48,6	90
CEM III/A 42,5 N	0,0 ¹⁾	30,8	41,7	28
	12,4	37,0	47,4	56
	15,5	41,7	48,6	90
CEM VI (S-V)	0,0 ¹⁾	15,2	14,0	28
	11,9	20,8	30,3	56
	20,2	32,7	37,4	90

Legenda:

Redukcja CO_2 powyżej [%] : 10 20 30 40

1) poziom odniesienia

Uzyskane poziomy redukcji emisji CO_2 przypadającej na uzyskanie 1 MPa wytrzymałości na ściskanie świadczą, że zarówno obniżanie stosunku w/c oraz stosowanie wydłużonego okresu dojrzewania w badaniach (56 dni i 90 dni) pozwala istotnie ograniczyć poziom emisji CO_2 . Największą redukcję uzyskuje się stosując obniżony stosunek $w/c=0,3$ oraz wydłużony czas dojrzewania - 90 dni (tab.70). Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie cementów oraz obliczenia związane z poziomem emisyjności wykazują możliwość redukcji emisyjności betonu poprzez zabiegi technologiczne: obniżenie stosunku w/c oraz ocenę wytrzymałości betonu na ściskanie

w czasie równoważnym (56 dni i 90 dni). Uzyskanie optymalnie ekologicznego betonu wymaga zastosowania obydwu z tych zabiegów, co często kłóci się z wymaganiami stawianymi przez współczesne budownictwo, jak np. uzyskanie szybkiego przyrost wytrzymałości betonu we wczesnym okresie dojrzewania czy deklarowanie przez producenta betonu klasy wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania. Fakt ten powinien częściej być respektowany przez autorów różnego rodzaju wytycznych i specyfikacji technicznych oraz nadzoru budowlanego. Stosowne zmiany są także pożądane w procesie kształcenia kadr dla budownictwa.

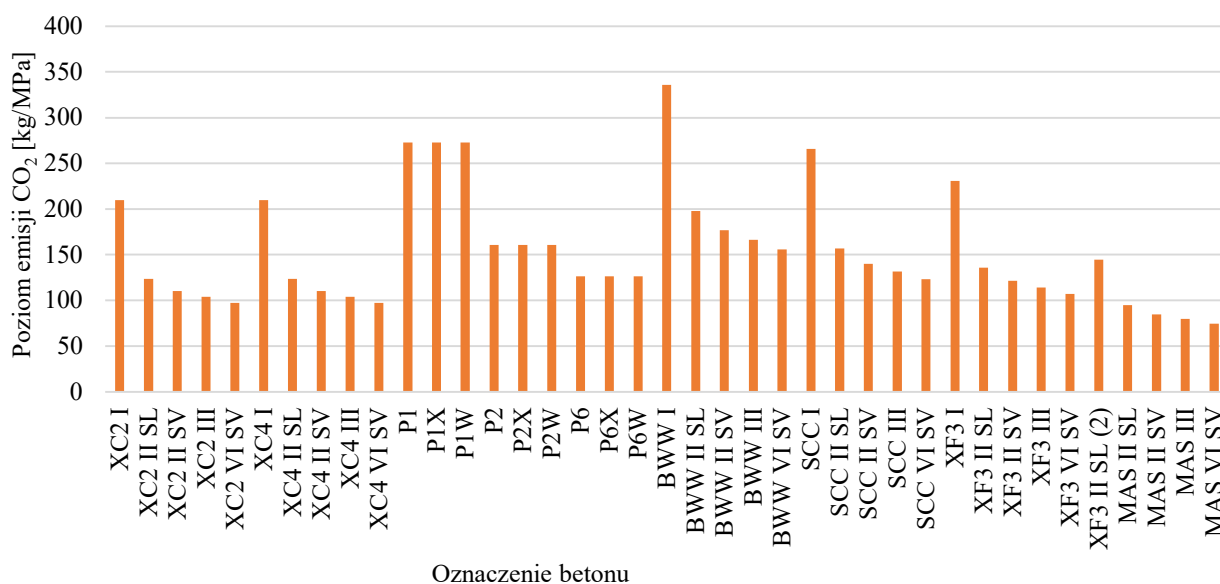
4.6.3. Emisyjność badanych betonów

Na podstawie poziomów emisji CO₂ poszczególnych cementów (rys. 66) oraz ilości cementu w betonach obliczono poziom emisji CO₂ przypadający na wyprodukowanie 1 m³ betonu. Wyznaczono również poziom emisji CO₂ przypadający na uzyskanie 1 MPa wytrzymałości na ściskanie w odniesieniu do wytrzymałości po 28 oraz 90-dniach dojrzewania. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 67 oraz na rysunkach 68 i 69.

Tabela 67. Poziom emisji CO₂ badanych betonów

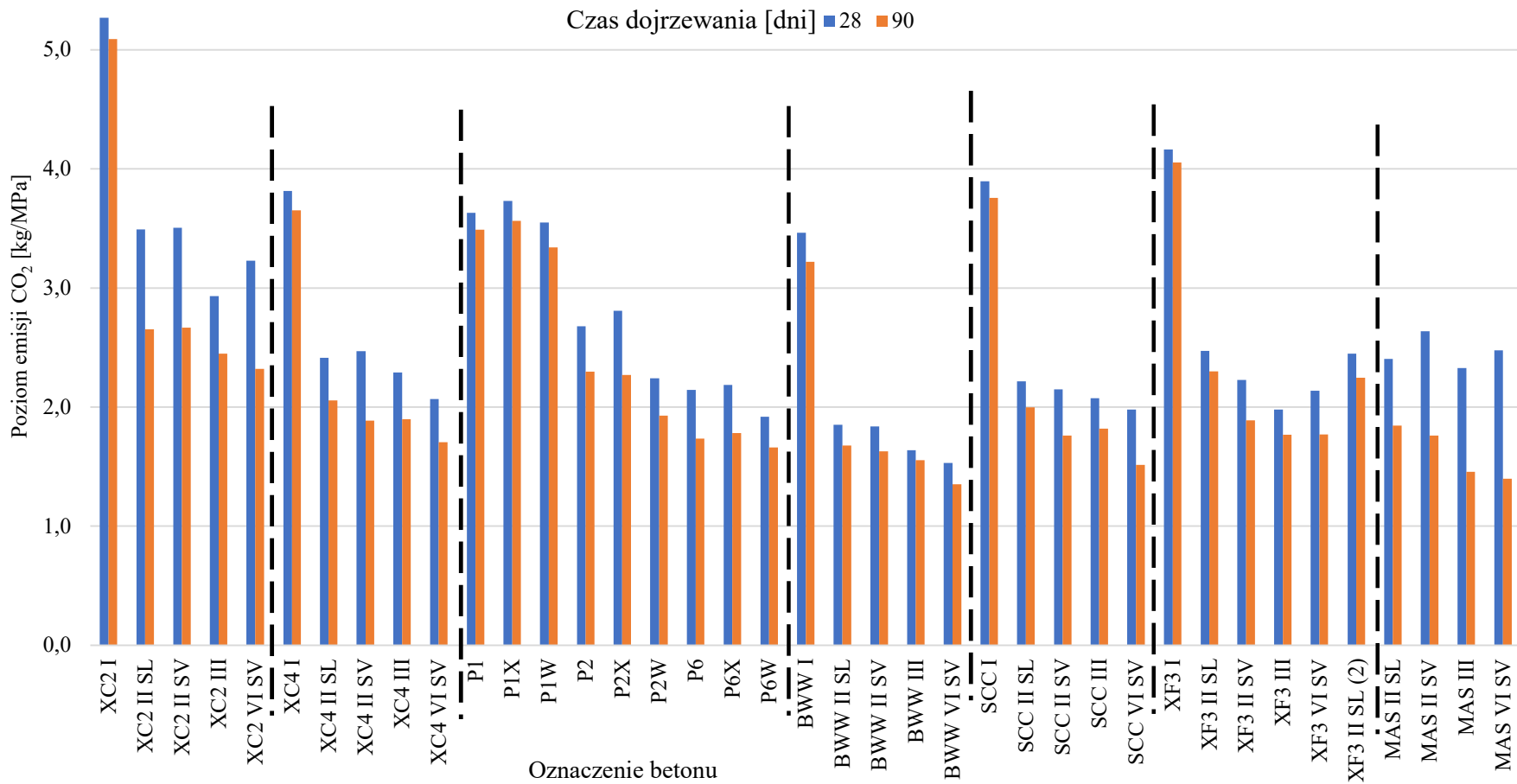
Oznaczenie betonu	Ilość cementu [kg/m ³]	Poziom emisji CO ₂ [kg/m ³]	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} , cube [MPa]		Poziom emisji CO ₂ [kg/MPa]	
			po 28 dniach	po 90 dniach	po 28 dniach	po 90 dniach
XC2 I	300	210	39,8	41,2	5,27	5,09
XC2 II SL	300	124	35,4	46,6	3,49	2,65
XC2 II SV	300	110	31,5	41,4	3,50	2,67
XC2 III	300	104	35,4	42,4	2,93	2,45
XC2 VI SV	300	97	30,1	41,9	3,23	2,32
XC4 I	300	210	55,0	57,4	3,81	3,65
XC4 II SL	300	124	51,2	60,1	2,41	2,06
XC4 II SV	300	110	44,7	58,5	2,47	1,89
XC4 III	300	104	45,3	54,7	2,29	1,90
XC4 VI SV	300	97	47,0	57,0	2,07	1,71
P1	390	273	75,1	78,1	3,63	3,49
P1X	390	273	73,1	76,5	3,73	3,56
P1W	390	273	76,8	81,6	3,55	3,34
P2	390	161	60,0	69,9	2,68	2,30
P2X	390	161	57,2	70,8	2,81	2,27
P2W	390	161	71,7	83,4	2,24	1,93
P6	390	126	58,9	72,8	2,15	1,74
P6X	390	126	57,8	70,9	2,19	1,78
P6W	390	126	65,9	76,1	1,92	1,66
BWW I	480	336	96,9	104,2	3,46	3,22
BWW II SL	480	198	106,9	117,9	1,85	1,68
BWW II SV	480	177	96,1	108,4	1,84	1,63
BWW III	480	166	101,4	106,8	1,64	1,56
BWW VI SV	480	156	101,6	115,1	1,53	1,35
SCC I	380	266	68,2	70,7	3,89	3,76
SCC II SL	380	157	70,6	78,4	2,22	2,00
SCC II SV	380	140	65,1	79,5	2,15	1,76
SCC III	380	131	63,4	72,3	2,07	1,82
SCC VI SV	380	123	62,2	81,3	1,98	1,51

Oznaczenie betonu	Ilość cementu [kg/m ³]	Poziom emisji CO ₂ [kg/m ³]	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} , cube [MPa]		Poziom emisji CO ₂ [kg/MPa]	
			po 28 dniach	po 90 dniach	po 28 dniach	po 90 dniach
XF3 I	330	231	55,4	56,9	4,16	4,05
XF3 II SL	330	136	55,0	59,1	2,47	2,30
XF3 II SV	330	121	54,5	64,3	2,23	1,89
XF3 III	330	114	57,7	64,6	1,98	1,77
XF3 VI SV	330	107	50,0	60,4	2,14	1,77
XF3 II SL (2)	350	144	58,9	64,2	2,45	2,25
MAS II SL	230	95	39,4	51,4	2,41	1,84
MAS II SV	230	85	32,1	48,1	2,64	1,76
MAS III	230	80	34,2	54,6	2,33	1,46
MAS VI	230	75	30,1	53,3	2,48	1,40



Rys. 68. Poziom emisji CO₂ w przeliczeniu na 1m³ badanych betonów

Poziom emisji CO₂ przypadający na uzyskanie 1m³ betonu jest ściśle związany, jak już wcześniej wspomniano, z poziomem emisji użytego cementu (zawartością klinkieru portlandzkiego) oraz ilością cementu zastosowaną w składzie betonu (rys. 68). Poziom emisji CO₂ dla betonów z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R jest o około 40÷50% wyższy niż w przypadku zastosowania cementów niskoemisyjnych. Podwyższonym poziomem emisji charakteryzują się betony wysokowytrzymałościowe BWW oraz betony samozagęszczalne SCC, a także betony dla prefabrykacji, co wynika ze zwiększonej zawartości cementu w m³ betonu. Analizując emisyjność betonów, poza poziomem emisji przypadającym na 1m³ betonu, należy również wziąć pod uwagę ilość emisji CO₂ przypadającą na uzyskanie 1MPa wytrzymałości na ściskanie (rys.69).



Rys. 69. Poziom emisji CO₂ badanych betonów w przeliczeniu na uzyskanie 1MPa wytrzymałości na ściskanie po 28 oraz 90-dniach dojrzewania

Analizując poziomy emisji CO₂ przypadające na uzyskanie 1MPa wytrzymałości na ściskanie betonów w klasach ekspozycji XC2 (w/c=0,65) oraz XC4 (w/c=0,55) zauważyć można, iż obniżenie stosunku w/c pozwoliło ograniczyć ślad węglowy o około 25% (rys. 69). Najniższym poziomem emisji, w przeliczeniu na 1MPa wytrzymałości na ściskanie, charakteryzował się beton wysokowartościowy BWW. Zbliżony poziom emisji uzyskano również dla betonów masywnych po 90 dniach dojrzewania. Uzyskiwane poziomy emisji CO₂/1MPa ulegają obniżeniu wraz z wydłużeniem czasu dojrzewania betonu. Spadek ten jest wyraźnie wyższy w przypadku betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych niż dla betonów z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Potwierdza to potrzebę szerszego stosowania czasu równoważnego (56 dni i 90 dni) w ocenie cech wytrzymałościowych i trwałościowych betonu z udziałem cementów niskoemisyjnych o zredukowanej zawartości klinkieru cementowego w składzie o minimum 35% w stosunku do cementu portlandzkiego CEM I. Należy zaznaczyć, że analizę poziomu emisji CO₂ badanych betonów przeprowadzono w oparciu o wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek betonu dojrzewających w warunkach laboratoryjnych (po rozformowaniu próbki przechowywano w wodzie o temp. 20±2°C). Wytrzymałość betonu w konstrukcji jest uzależniona również od sposobu oraz czasu pielęgnacji cieplno-wilgotnościowej betonu, który ze względu na wolniejszy przyrost wytrzymałości wczesnej (po 2,7,14-dniach dojrzewania) betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych w porównaniu do betonów z cementem portlandzkim CEM I powinien być wydłużony (szczególnie w warunkach obniżonej temperatury). Podstawowe wytyczne dotyczące minimalnego czasu pielęgnacji betonu, w zależności od klasy pielęgnacji oraz rozwoju wytrzymałości na ściskanie betonu, podano w normie PN-EN 13670:2011 [91].

5. PODSUMOWANIE

Produkcja podstawowego składnika cementów powszechnego użytku, klinkieru portlandzkiego jest surowco – i energochłonna. Proces wytwarzania (syntezy) klinkieru portlandzkiego wymaga eksploatacji złóż nieodnawialnych surowców naturalnych, spalania paliw kopalnych (pyłu węglowego) oraz jest związany z emisją gazów, głównie dwutlenku węgla. Podstawowym i efektywnym sposobem na redukcję uciążliwości procesu produkcji cementu na środowisko jest zastąpienie części klinkieru portlandzkiego w jego składzie przez nieklinkierowe składniki główne. Stosując w produkcji cementu przemysłowe produkty uboczne: granulowany żużel wielkopiecowy (S) pozyskiwanego w procesie wytopu surówki żelaza w wielkim piecu hutniczym, czy popiół lotny krzemionkowy (V) powstający przy spalaniu węgla kamiennego w energetyce, redukuje się zużycie klinkieru portlandzkiego oraz eliminuje konieczność składowania w/w ubocznych surowców jako odpadów. Obserwowany, w skali globalnej, niedobór żużla (S) oraz popiołu lotnego (V) skłaniają producentów cementu do stosowania innych nieklinkierowych składników głównych cementu. W pewnym stopniu alternatywę może stanowić stosowanie wapienia (L,LL), który jest surowcem dostępnym dla większości producentów cementu, jednakże jest zaliczany do składników inertnych.

W przeprowadzonych badaniach własnych podjęto próbę pokazania szerszej możliwości aplikacji cementów niskoemisyjnych w budownictwie, szczególnie w obszarach dotychczas zdominowanych przez cementy z wyższą zawartością klinkieru portlandzkiego: cementy portlandzkie CEM I oraz cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A, B.

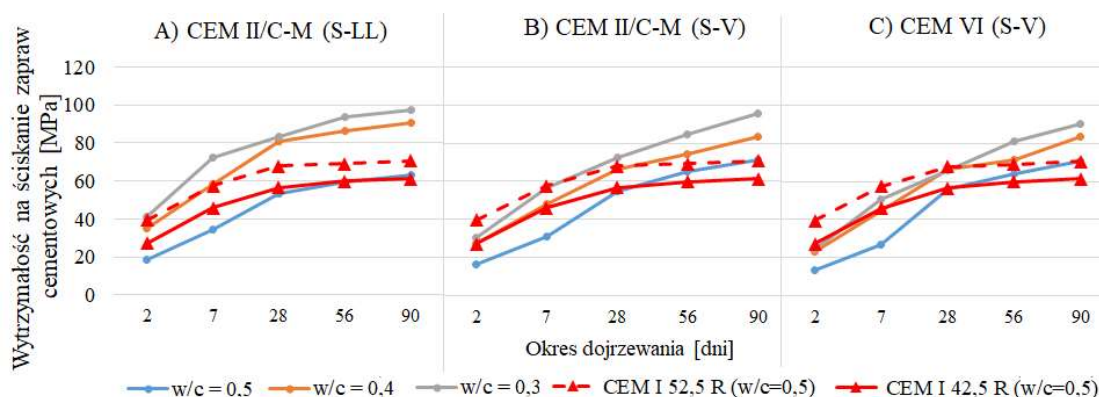
Część eksperymentalna pracy obejmowała ocenę właściwości cementów przygotowanych w skali laboratoryjnej, jak i uzyskanych w trakcie prób przemysłowych oraz regularnej produkcji. Przeanalizowano oddziaływania składników cementów w układach trójskładnikowych klinkier portlandzki (K)-żużel wielkopiecowy (S) -wapień (LL) oraz klinkier portlandzki(K)-popiół lotny krzemionkowy (V) -wapień (LL) na właściwości reologiczne mieszanki betonowej, wytrzymałość na ściskanie i inne cechy trwałościowe (głębokość penetracji wody pod ciśnieniem, mrozoodporność zwykłą). Dynamikę rozwoju wytrzymałości na ściskanie cementów w czasie badano przy stosunku w/c równym 0,35; 0,50 oraz 0,55. Stwierdzono występowanie efektu synergii składników cementu w układzie trójskładnikowym z możliwością częściowego zastąpienia wapieniem (LL) granulowanego żużla wielkopiecowego (S) oraz popiołu lotnego krzemionkowego (V), bez istotnych zmian we właściwościach wytrzymałościowych cementu (tabela 68). Efekt ten jest szczególnie widoczny w przypadku zawartości wapienia w składzie cementu na poziomie do 15%. Także, w przypadku wszystkich badanych cementów popiołowo-żużlowych (S,V), widać synergię składników i pozytywny wpływ obniżonego stosunku w/c na właściwości tych cementów trójskładnikowych (rys.70).

Tabela 68. Efekt synergicznego oddziaływania wapienia (LL) z żużlem wielkopieczowym (S) oraz popiołem lotnym krzemionkowego (V)

Cement trójskładnikowy	Cement odniesienia*	Stosunek wytrzymałości na ściskanie cementów (1) / (2) [%] po upływie														
		2 dni			7 dni			28 dni			56 dni			90 dni		
		stosunek wodno-cementowy														
(1)	(2)	0,35	0,50	0,55	0,35	0,50	0,55	0,35	0,50	0,55	0,35	0,50	0,55	0,35	0,50	0,55
CEM 15 (S-LL)	CEM 15 S	83	108	100	85	101	100	98	93	96	96	91	95	101	89	91
CEM 30 (S-LL)	CEM 30 S	116	119	115	100	104	95	96	90	76	91	92	79	93	87	78
CEM 50 (S-LL)	CEM 50 S	93	93	91	98	95	82	85	78	79	86	78	75	82	78	79
CEM 15 (V-LL)	CEM 15 V	96	105	103	95	105	104	102	96	101	99	101	96	101	94	93
CEM 30 (V-LL)	CEM 30 V	124	121	122	118	120	114	107	102	98	98	100	95	96	94	94
CEM 50 (V-LL)	CEM 50 V	121	105	102	115	106	101	113	93	103	104	99	101	104	93	91

*- odniesiono do wytrzymałości na ściskanie cementu odniesienia przy stosunku w/c odpowiednio: w/c=0,35; w/c=0,50; w/c=0,55

Uzyskane wyniki badań wytrzymałości na ściskanie cementów produkowanych w warunkach próby przemysłowej tj. cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C-M (S-LL) i CEM II/C-M (S-V) oraz cementu wieloskładnikowego CEM VI (S-V), a także cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA potwierdziły niższą dynamikę rozwoju wytrzymałości na ściskanie w początkowym okresie dojrzewania tj. po 2 i 7-dniach w porównaniu do cementów portlandzkich CEM I. Poziomy wytrzymałości na ściskanie cementów niskoemisyjnych po 28 dniach dojrzewania były zbliżone do wytrzymałości cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Wytrzymałość wczesna (po 2 i 7-dniach dojrzewania) cementów niskoemisyjnych przy stosunku w/c=0,4 była porównywalna z wytrzymałością cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R przy w/c=0,5. Obniżenie w/c do poziomu w/c=0,3 skutkowało dalszą poprawą uzyskiwanych wyników wytrzymałości na ściskanie (rys.70).



Rys. 70. Wpływ stosunku w/c na wytrzymałość na ściskanie cementu: A) portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-LL); B) portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-V); C) wieloskładnikowego CEM VI (S-V)

W ramach badań własnych przeanalizowano również wpływ temperatury dojrzewania na wytrzymałość na ściskanie cementów niskoemisyjnych. Określono wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych dojrzewających w temperaturze +8°C, +20°C oraz +38°C po 2, 7 oraz 28-dniach dojrzewania. Po 2 oraz 7-dniach dojrzewania w temperaturze +38°C, uzyskane poziomy wytrzymałości na ściskanie cementów niskoemisyjnych były zbliżone do wytrzymałości cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R dojrzewającego w temp. 20°C.

Część badawczą związaną z analizą właściwości cementów zakończono określeniem wpływu rodzaju zastosowanego cementu niskoemisyjnego na reologię zapraw. Przy użyciu reometru Viskomatu XL firmy Schleibinger Gerate, określono lepkość plastyczną oraz granicę płynięcia zapraw cementowych. Uzyskane wyniki badań pokazały korzystniejsze właściwości reologiczne cementów niskoemisyjnych w odniesieniu do właściwości uzyskanych przy stosowaniu cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Szczególnie pozytywnymi właściwościami reologicznymi charakteryzowały się cementy: portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M(S-V) oraz cement wieloskładnikowy CEM VI (S-V), co jest spowodowane efektem łożyskowania sferycznych ziaren popiołu lotnego krzemionkowego V i jego znacząco niższą gęstością właściwą (przy stałej masie, większa ilość objętościowa zaczynu).

W części badawczej wykazano również możliwości aplikacji cementów niskoemisyjnych w budownictwie. Wyniki badań betonów zwykłych spełniających wymagania dla klasy ekspozycji XC2 (w/c=0,65) oraz klasy ekspozycji XC4 (w/c=0,55) wg normy PN-B-06265 [103] potwierdziły pełną przydatność cementów niskoemisyjnych. Poza odpowiednim poziomem wytrzymałości betony z użyciem cementów niskoemisyjnych charakteryzowały się niższym skurczem niż beton z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Szczególnie niskim poziomem skurczu charakteryzowały się betony z użyciem cementów popiołowo-żuźlowych CEM II/C-M(S-V) oraz CEM VI (S-V), wyniki były zbliżone do wyników uzyskanych przy zastosowaniu cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/N.

Wyniki badań betonu, z użyciem cementów niskoemisyjnych, przeznaczonych dla prefabrykacji wykazały możliwość uzyskania wytrzymałości na ściskanie powyżej 20 MPa po 18 godzinach dojrzewania przy zastosowaniu naporzania niskoprężnego. Dodatkowy wzrost poziomów wytrzymałości na ściskanie po 18 i 24-godzinach dojrzewania można uzyskać poprzez obniżenie stosunku w/c oraz zastosowanie domieszki przyspieszającej twardnienie. Stosując cementy niskoemisyjne w betonach wysokowytrzymałościowych uzyskano poziom wytrzymałości na ściskanie powyżej 60 MPa już po 7-dniach dojrzewania. W dłuższych terminach badań (56, 90, 180, 360 dni) wytrzymałość na ściskanie betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych była wyższa niż przy użyciu cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R, co jest potwierdzeniem wyników badań znanych w literaturze. Betony wysokowytrzymałościowe charakteryzowały się wysoką szczelnością (głębokość penetracji wody pod ciśnieniem poniżej 22mm po 28-dniach dojrzewania oraz poniżej 12mm po 90-dniach dojrzewania), co zapewniło spełnienie wymagań dla mrozoodporność betonu w stopniu F150 już po 28 dniach dojrzewania. Prawidłowa struktura napowietrzenia betonu dla klasy ekspozycji XF3 z użyciem cementów

niskoemisyjnych (zawartość mikroporów $A_{300} > 1,5$ % obj. oraz współczynnik rozmieszczania porów $L < 0,2$ mm) pozwoliła na uzyskanie betonów mrozoodpornych w stopniu F150 po 28 oraz 90 dniach dojrzewania.

Stosując cementy niskoemisyjne w składzie betonu masywnego uzyskano zbliżone właściwości mieszanki betonowej oraz betonu stwardniałego, jak w przypadku stosowania cementu hutniczego CEM III/A 42,5N LH/HSR/N, powszechnie stosowanego spoiwa w produkcji betonu masywnego.

Analizując aspekty ekologiczne związane z szerszym stosowaniem cementów niskoemisyjnych przeanalizowano poziom emisji CO_2 stosowanych w badaniach cementów i betonów oraz zwrócono uwagę na ich poziom radioaktywności. Porównanie śladu węglowego betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych oraz betonów z cementami portlandzkimi CEM I przedstawiono w tabeli 69.

Tabela 69. Ślad węglowy badanych betonów

Oznaczenie betonu		XC2	XC4	P	PX	PW	BWW	SCC	XF3	MAS						
Rodzaj cementu	CEM I 42,5 R	210		-			336	266	231	-						
	CEM I 52,5 R	-		273			-									
	CEM II/C-M(S-LL)	124		161			198	157	144*	95						
		34	48	37	44	26	34	25	36		37	42	47	48	43	47
	CEM II/C-M(S-V)	110		-			177	140	121	85						
		33	48	35	48	-			47		49	45	53	46	53	
	CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	104		-			166	131	114	80						
44		52	40	48	-			53	52		47	52	52	56		
CEM VI (S-V)	97		126			156	123	107	75							
	39	54	46	53	41	50	41	50		46	50	56	58	49	60	49

Legenda:

- poziom emisji CO_2 [kg/m^3]
- redukcja emisyjności CO_2/MPa względem betonu z CEM I po 28 dniach dojrzewania [%]
- redukcja emisyjności CO_2/MPa względem betonu z CEM I po 90 dniach dojrzewania [%]

*) poziom emisji dla betonu oznaczonego XF3 II SL (2)

Wyniki badań stężenia aktywności radionuklidów potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-232 oraz wyznaczony na ich podstawie wskaźnik promieniotwórczości I [-] cementów niskoemisyjnych, wskazują na brak zagrożenia promieniotwórczego i spełnienie wymagań zawartych w Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 7 stycznia 2021 Poz. 33 [117], określonych dla materiałów budowlanych stosowanych w budynkach przeznaczonych na stały pobyt ludzi i inwentarza żywego.

Rosnące wymagania środowiskowe oraz ograniczona dostępność żużla wielkopieczowego oraz popiołu lotnego na rynku krajowym stanowiły zachętę do rozpoczęcia przez autora dalszych badań związanych z kształtowaniem składu betonu pod kątem optymalizacji poziomu emisji CO_2 przypadającej na uzyskanie 1 MPa wytrzymałości na ściskanie. Obszar badań zostanie skoncentrowany na betonach wysokowytrzymałościowych BWW oraz samozagęszczalnych SCC oraz wdrażaniu do produkcji cementów niskoemisyjnych trójskładnikowych z użyciem wapienia jako składnika głównego.

6. WNIOSKI

Przeprowadzone studium literaturowe oraz analiza wyników badań własnych pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków.

1. Komponowanie składu cementu z użyciem nieklinkierowych składników głównych takich jak: granulowany żużel wielkopiecowy (S), popiół lotny krzemionkowy (V) oraz wapień (LL) stwarza szerokie możliwości kształtowania właściwości cementu oraz pozwala uzyskać cement niskoemisyjny o szerokiej przydatności w budownictwie.
2. Zastąpienie części granulowanego żużla wielkopiecowego (S), a także popiołu lotnego krzemionkowego (V) w składzie cementu wapieniem (LL) pozwala na osiągnięcie porównywalnych lub wyższych poziomów wytrzymałości na ściskanie po 2 oraz 7-dniach dojrzewania, co jest efektem synergicznego oddziaływania (aktywności) składników na właściwości cementu.
3. Cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/C-M (S-LL) i CEM II/C-M (S-V) oraz cement wieloskładnikowy CEM VI (S-V) mogą być z powodzeniem stosowane w składzie betonu zwykłego, masywnego oraz wysokowytrzymałościowego i samozagęszczalnego.
4. Produkcja betonów mrozoodpornych z wykorzystaniem cementów niskoemisyjnych wymaga kompatybilności stosowanych domieszek z cementem i uzyskania prawidłowej charakterystyki napowietrzenia betonu.
5. Zastosowanie naparzenia niskoprężnego, obniżonego stosunku w/c oraz domieszek przyspieszających twardnienie umożliwia zastosowanie cementów niskoemisyjnych w produkcji betonowych (żelbetowych) elementów prefabrykowanych.
6. Obniżenie stosunku w/c w betonie jest najbardziej efektywną metodą poprawy wytrzymałości na ściskanie betonów z użyciem cementów niskoemisyjnych, w szczególności poprawy wytrzymałości wczesnej po 2 oraz 7-dniach dojrzewania. Wymaga to stosowania efektywnych domieszek uplastyczniających i upłynniających w składzie kompozytów cementowych.
7. Zaprawy z użyciem cementów niskoemisyjnych charakteryzują się lepszymi właściwościami reologicznymi w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I. Pozytywny wpływ cementów niskoemisyjnych na właściwości reologiczne badanych betonów z zastosowaniem superplastyfikatorów był mniej wyraźny. Wskazuje to na konieczność modyfikacji składu domieszek do betonu w kierunku lepszej kompatybilności z cementami o obniżonej zawartości klinkieru portlandzkiego.
8. Poziom emisji CO₂ przy produkcji cementów niskoemisyjnych jest o ok. 40-50% niższy niż przy produkcji cementu portlandzkiego CEM I. Użycie cementów niskoemisyjnych w betonie pozwala zredukować poziom emisji CO₂ przypadający na 1 MPa wytrzymałości na ściskanie o ok. 30-50% po 28 dniach dojrzewania oraz o ok. 40-60% po 90 dniach dojrzewania.

9. Poziom radioaktywności cementów z zastosowaniem ubocznych produktów przemysłowych po obróbce termicznej tj.: granulowanego żużla wielkopieczowego (S) oraz popiołu lotnego krzemionkowego (V) nie stanowi zagrożenia dla środowiska, ludzi oraz zwierząt.

10. Badania przyszłościowe powinny być ukierunkowane na szersze stosowanie w budownictwie cementów niskoemisyjnych. Wymaga to zrozumienia od wszystkich uczestników procesu budowlanego, od producenta cementu począwszy, a na nadzorze budowlanym skończywszy.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Ajdukiewicz, A., Beton a rozwój zrównoważony, *BTA*, 3 (27) (2004) 38–44.
- [2] Ajdukiewicz, A., *Eurokod 2. Podręczny skrót dla projektantów konstrukcji żelbetowych*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2008.
- [3] Ajdukiewicz, A., i Kowalczyk, A., Zastosowania betonów wysokowartościowych w budynkach wysokich, *Konf. Dni Betonu*, 2004.
- [4] Baran, T., Ograniczenie emisji gazów i pyłów związane z wykorzystaniem odpadów w przemyśle cementowym, *Mater. Bud.* 568, 2019, 4–7.
- [5] De Belie, N., Soutsos, M., i Gruyaert, E., *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials*, (2018).
- [6] Bentz, D. P., Zunino, F., i Lootens, D., Chemical vs. Physical Acceleration of Cement Hydration., *Concr. Int. Des. Constr.* 38, 2016, 37–44.
- [7] Biliszczuk J., Onysyk J., Barcik W., Prabucki P., Sułkowski M., Szczepański J., Toczkiwicz R., Tomiczek M., Tukendorf A., Tukendorf K., A. A. ., Most Rzędziński w ciągu Autostradowej Obwodnicy Wrocławia, *Inżynieria i Bud.* 68, 2012 63–69.
- [8] Bonavetti, V., Donza, H., Rahhal, V., i Irassar, E., Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement, *Cem. Concr. Res.* 30, 2000, 703–708.
- [9] Przemysł cementowy w liczbach, *Stowarzyszenie Producentów Cementu*, Kraków, 2022.
- [10] Chłędzyński, S., i Garbacik, A., *Cementy wieloskładnikowe w budownictwie*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2008.
- [11] Czarnecki, L., i Łukowski, P., Wpływ domieszek i dodatków polimerowych na trwałość betonu, *Cement Wapno Beton*, 6 (8/70), 2003, 300-310.
- [12] Damineli, B. L., Kemeid, F. M., Aguiar, P. S., i John, V. M., Measuring the eco-efficiency of cement use, *Cem. Concr. Compos.* 32, 2010, 555–562.
- [13] Dhir, R. K., Limbachiya, M. C., McCarthy, M. J., i Chaipanich, A., Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction, *Mater. Struct. Constr.* 40, 2007, 459–473.
- [14] Divsholi, B. S., Lim, T. Y. D., i Teng, S., Durability Properties and Microstructure of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 8, 2014, 157–164.
- [15] Divsholi, B. S., Lim, T. Y. D., i Teng, S., Durability Properties and Microstructure of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 8 2014, 157–164.
- [16] Gajewski, R., i Tadeusz, J., Budowa fundamentów elektrowni wiatrowych – jako przykład aplikacji betonów wysokowartościowych (BWW) w Polsce Rafał Gajewski, Tadeusz Jarzębowski, *Konf. Dni Betonu*, 2016.

- [17] Gałań, P., Paszkowski, A., i Wawrzeniecki, K., Beton do pali wierconych i pali przemieszczeniowych formowanych w gruncie – wymagania formalne i wyniki badań, *Konf. Dni Betonu*, 2018, 179–192.
- [18] GDDKiA, *M-13.01.00 v03 – Beton Konstrukcyjny w Drogowych Obiektach Inżynierskich*, 2019.
- [19] Giergiczny, E., i Góralna, K., Mielony granulowany żużel wielkopieczowy - dodatek do betonu typu II, *BTA*, 2008, 56–59.
- [20] Giergiczny, Z., Świerczyński, W., Heng, S., TRWAŁOŚĆ BETONU W KONSTRUKCJACH MOSTOWYCH, *Semin. Wrocławskie Dni Most.*, 2012.
- [21] Giergiczny, Z., Dodatki mineralne – niezastąpione składniki współczesnego cementu i betonu, *Mater. Bud.*, 2009, 46–50.
- [22] Giergiczny, Z., Współczesne cementy żużlowe w budownictwie, *XVI Konf. „Reologia w Technol. betonu”*, 2015.
- [23] Giergiczny, Z., Stosowanie dodatków typu II w składzie betonu wg normy PN-EN 206:2014, *Mater. Bud.*, 1, 2015, 112–113.
- [24] Giergiczny, Z., Fly ash and slag, *Cem. Concr. Res.* 124, 2019.
- [25] Giergiczny, Z., Batog, M., DOŚWIADCZENIA W STOSOWANIU CEMENTU PORTLANDZKIEGO ŻUŻLOWEGO CEMII/B-S 42,5N W BUDOWIE NAWIERZCHNI BETONOWYCH, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2018.
- [26] Giergiczny, Z., i Boos, P., Testing the frost resistance of concrete with different cement types – experience from laboratory and practice, *Archit. Civ. Eng. Environ.* 3, 2010, 41–51.
- [27] Giergiczny, Z., i Garbacik, A., Efekt synergii dodatków mineralnych w składzie cementów wieloskładnikowych, *Reologia w technologii betonu. XII Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cement - właściwości i zastosowanie”*, Gliwice, 2010.
- [28] Giergiczny, Z., Król, A., Tałaj, M., Wandoch, K., Performance of Concrete with Low CO₂ Emission, *Energies* 13 (2020).
- [29] Giergiczny, Z., Piechówka, M., Sokołowski, M., Właściwości cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/A,B-M zawierającego wapień (L, LL), *BTA* 3, 2009, 54–56.
- [30] Giergiczny, Z., Małolepszy, J., Szwabowski, J., Śliwiński, J., *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*, Górażdże Cement S.A., Opole, 2002.
- [31] Giergiczny, Z., i Sokołowski, M., Cement z dodatkiem kamienia wapiennego CEM II/A ,B-LL – właściwości i możliwości stosowania w budownictwie, *BTA*, 2008, 54–57.
- [32] Giergiczny, Z., *Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2006.
- [33] Glinicki, M., Problem reaktywności kruszywa – cz. 2 kategoryzacja i przeciwdziałanie, *BTA* 3, 2019, 62–65.
- [34] Glinicki, M. A., i I, M., Ocena napowietrzenia betonów w nawierzchniach jezdni i parkingów, *Drogi i Mosty*, 1, 2004, 5–23.

- [35] Glinicki, M., Zieliński, Diagnostyka mikrostruktury porów w betonie wbudowanym w konstrukcje i nawierzchnie, *Konf. Dni Betonu*, 2006.
- [36] Glinicki, M., Jaskulski, R., i Dąbrowski, M., Krytyczny przegląd zasad projektowania i sprawdzania mrozoodporności wewnętrznej betonu przeznaczanego na konstrukcje drogowe, *Drogi i Mosty*, 15, 2016, 21–43.
- [37] Gołaszewski, J., *Projektowanie betonu samozagęszczalnego*, Warszawa, 2021.
- [38] Golda, A., Rozprawa doktorska ODPORNOŚĆ BETONU NA ODDZIAŁYWANIE ŚRODOWISKA W KONSTRUKCJACH MASYWNYCH, NA PRZYKŁADZIE BUDOWY BLOKÓW NR 5 I 6 ELEKTROWNI OPOLE, *Politechnika Śląska*, 2017.
- [39] Górak, P., Gauda, J., Wójcik, A., Grądzki, A., Zmniejszenie śladu węglowego w konstrukcjach mostowych za pomocą rozwiązań materiałowych dla betonów opartych na cementach nisko-klinkierowych, *Konf. Dni Betonu*, Wisła, 2021, 211-222.
- [40] Gruszczyński, M., Norma PN-B-06265:2018-10 „Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12” – jakie zmiany wniesie dla producentów betonu?, *BTA* 4(84), 2018, 72–75.
- [41] Gruyaert, E., Van Den Heede, P., i De Belie, N., Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient - Effect of carbonation on the pore structure, *Cem. Concr. Compos.* 35, 2013, 39–48.
- [42] Instytut Techniki Budowlanej (ITB), Deklaracja środowiskowa III typu - EPD cementy CEM I, CEM II, CEM II, CEM IV, CEM V produkowane w Polsce, *Stowarzyszenie Producentów Cementu*, 2020, 1–8.
- [43] Instytut Techniki Budowlanej (ITB), Deklaracja środowiskowa III typu - EPD cementy CEM I, CEM II, CEM II, CEM IV, CEM V produkowane w Polsce, *Stowarzyszenie Producentów Cementu*, 2020, 1–8.
- [44] J.A., R., i M., D., Promieniotwórczość naturalna wybranych kruszyw budowlanych, *Mater. Ceram.* 61, 2009, 55–58.
- [45] Jaśniok, M., Zabezpieczenie stali zbrojeniowej przed korozją w betonie metodą cynkowania ogniowego, *Przegląd Budowlany*, 2, 2018, 18–23.
- [46] Jerzy, D., Piotr, G., i Konrad, G., Beton SCC jako alternatywa do wykonywania konstrukcji w budownictwie mostowym na przykładzie budowy węzła Sośnica, *BTA* 4, 2009, 42–46.
- [47] Józef, J., Agnieszka, W., i Tomasz, R., *Betony ultrawysokowartościowe – właściwości technologiczne, zastosowania*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2008.
- [48] K, F., M, B., i Maliszewicz P, Cechy trwałościowe betonów mostowych na przykładzie obiektów mostowych autostrady A2 na odcinku Konin - Koło - Dąbie, *Inżynieria i Budownictwo*, 9, 2007, 481–485.
- [49] Kaszuba, S., Rozprawa doktorska KSZTAŁTOWANIE SKŁADU TRWAŁEGO BETONU Z UDZIAŁEM CEMENTÓW WIELOSŁADNIKOWYCH (CEM II, CEM III) DO ZASTOSOWANIA W BUDOWNICTWIE DROGOWO-MOSTOWYM, *Politechnika Śląska*, 2019.

- [50] Khan, S. U., Nuruddin, M. F., Ayub, T., i Shafiq, N., Effects of different mineral admixtures on the properties of fresh concrete, *Scientific World Journal*, 2014.
- [51] Konrad, G., MasterEase – nowa gama domieszek zmniejszających lepkość mieszanek betonowych dla konstrukcji inżynierskich i betonów wysokowartościowych, *BTA*, 05, 2019, 63–65.
- [52] Konrad, G., Reologia kluczem do obróbki mieszanki betonowej w zakładach prefabrykacji, *Materiały Budowlane*, 3, 2021, 32–33.
- [53] Konrad, G., i Maciejski, J., Zastosowanie cementów hutniczych w prefabrykacji na przykładzie produkcji, *Konf. Dni Betonu*, 2012.
- [54] Król, A., Uwalnianie metali ciężkich z kompozytów mineralnych z uwzględnieniem oddziaływania środowiska, *Studia i monografie z.314. Politechnika Opolska*, Opole, 2012.
- [55] Król, A., Giergiczny, Z., i Kuterska-Warwas, J., Properties of Concrete Made with Low-Emission Cements CEM II/C-M and CEM VI, *Materials*, 13, 2257, 2020.
- [56] Kurdowski, W., *Chemia betonu i cementu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2010.
- [57] Kurdowski, W., Szelaąg, H., i Bochenek, A., Czynniki wpływające na odporność betonu na działanie mrozu, *XXVI Konf. Nauk. Awary Bud.*, 2013.
- [58] Łaźniewska-Piekarczyk, B., i Szwabowski, J., Kompatybilność układu: cement - domieszka napowietrzająca - domieszka upłynniająca w mieszankach na spoiwach cementowych, *Magazyn Autostrady*, 8, 2017, 41–46.
- [59] Li, Y., i Kwan, A. K. H., Ternary blending of cement with fly ash microsphere and condensed silica fume to improve the performance of mortar, *Cem. Concr. Compos.* 49, 2014, 26–35.
- [60] Łukowski, P., Domieszki przyspieszające wiązanie i twardnienie betonu, *BTA*, 2, 2014, 60–62.
- [61] Łukowski, P., *Modyfikacja materiałowa betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2016.
- [62] Machowska, A., i Walkowiak, R., Wartości współczynnika k dla popiołu lotnego stosowanego z cementem CEM III / A, 305–328.
- [63] Matthes, W., Vollpracht, A., Villagrán, Y., Kamali-Bernard, S., Hooton, D., Gruyaert, E., i in., *Ground granulated blast-furnace slag*, 2018.
- [64] Mierzwiński, A., Mierzwiński, M., Tomaszewski, K., Obląkowska, K., i Moskwik, K., *Przemysł cementowy w gospodarce odpadami*, Warszawa 2021.
- [65] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 1 sierpnia 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, 2019.
- [66] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, 2000.

- [67] Mohamed, A. R., Elsalamawy, M., i Ragab, M., Modeling the influence of limestone addition on cement hydration, *Alexandria Engineering Journal*, 54, 2015, 1–5.
- [68] Molendowska, A., Możliwość napowietrzenia betonu przez zastosowanie mikrosfer, *Zesz. Nauk. Politech. Śląskiej*, 2008.
- [69] Molendowska, A., i Wawrzeńczyk, J., Zastosowanie mikrosfer jako alternatywna metoda napowietrzania betonu, *BTA*, 4, 2011, 51–55.
- [70] Müller, C., Use of cement in concrete according to European standard EN 206-1, *HBRC Jurnal* 8, 2012, 1–7.
- [71] Neville, A. M., *Właściwości betonu*, wyd. 4, Polski Cement, Kraków, 2012.
- [72] Ostrowski, M., Rozprawa doktorska Rola popiołu lotnego i granulowanego żużla wielkopieczowego w kształtowaniu właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego, Politechnika Śląska, 2017.
- [73] Parisot, R. De, i Coppenholle, K., Europejski przemysł cementowy na drodze do neutralności klimatycznej cementu i betonu do roku 2050 w całym łańcuchu dostaw, *CEMBUREAU*, 2020.
- [74] Persson, B., Internal frost resisatnce ans salt frost scaling of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 2003, 373–379.
- [75] Raczkiwicz, W., i Grzmił, W., Ocena wpływu rodzaju cementu na proces karbonatyzacji betonu i korozji zbrojenia w próbkach żelbetowych, *Cement Wapno Beton*, 4, 2017.
- [76] Radosław, O., i Justyna, G., Badania właściwości BWW, *Konf. Dni Betonu*, 2021, 493–504.
- [77] Ramezianpour, A. A., Cement Replacement Materials; Properties, Durability, Sustainability., *Springer Geochemistry/Mineralogy* 7, 2014, 336.
- [78] Saito, H., Sakai, K., Saito, A., i Suzuki, Y., Performance of low carbon concrete using fly ash and ground granulated blast-furnace slag, *Materials*, 14, 2021.
- [79] Sakai, K., Matsuka, T., i Suzuki, Y., Low-Carbon Concrete Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag and Fly Ash, *Cement Science and Concrete Technology*, 64, 2010.
- [80] Samad, S., Shah, A., i Limbachiya, M. C., Strength development characteristics of concrete produced with blended cement using ground granulated blast furnace slag (GGBS) under various curing conditions, *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 42, 2017, 1203–1213.
- [81] Schöler, A., Lothenbach, B., Winnefeld, F., i Zajac, M., Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder, *Cement and Concrete Composites*, 55, 2015, 374–382.
- [82] Szruba, M., Beton – materiał budowlany coraz bardziej uniwersalny, *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 5, 2017, 54–60.
- [83] Thomas, M. D. A., i Moffatt, E. G., The Use of Polymeric Microspheres as an Alternative to Air-Entraining Admixtures for Providing Resistance to Freeze-Thaw and Salt Scaling, *Researchgate*, 2018.
- [84] Kiernożycki, W., Betonowe konstrukcje masywne, teoria wymiarowanie realizacja, *Polski Cement Sp. z o.o., Kraków*, 2003.

- [85] WBCSD, *Cement Sustainability Initiative, Getting the Numbers Right, Project Emissions Report*, 2016.
- [86] Wojciechowski, P., Karbonatyzacja betonu: trwałość vs sekwestracja CO₂, *BTA*, 2, 2021, 56–63.
- [87] WBCSD, *Cement Industry Energy and CO₂ Performance: Getting the Numbers Right*, 2016.
- [88] Zych, T., Trwałość współczesnego betonu w ujęciu norm europejskich, *Architektura, Czasopismo Techniczn*, 11, 2011.
- [89] *PN-EN 1015-3:2000/A1:2005 Metody badań zapraw do murów - Określenie konsystencji świeżej zaprawy za pomocą stolika rozplywu.*
- [90] *PN-EN 196-9:2010 Metody badania cementu - Część 9: Ciepło hydratacji - Metoda semiadiabatyczna.*
- [91] *PN-EN 13670:2011 Wykonanie konstrukcji z betonu.*
- [92] *PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu - Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.*
- [93] *PN-EN 197-1:2012 Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.*
- [94] Środa, B., Beton – niskoemisyjny materiał budowlany przyszłości, *BTA*, 5, 2017.
- [95] *PN-EN 206+A1:2016 Beton Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.*
- [96] Wpływ branży cementowej na gospodarkę Polski, *Stowarzyszenie Producentów Cementu*, Kraków, 2020.
- [97] Beton niskoemisyjny materiał budowlany, *Stowarzyszenie Producentów Cementu*, Kraków, 2021.
- [98] Strona internetowa: www.muratorplus.pl/biznes/raporty-i-prognozy/produkcja-cementu-w-polsce-w-roku-2020-nie-spadla-prognozy-na-2021 (dostęp: 13.09.2021).
- [99] Strona internetowa: www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume (dostęp: 10.09.2021).
- [100] *EN 197-5:2021 Cement – Part 5: Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI.*
- [101] Strona internetowa: www.vdz-online.de/zementindustrie/zahlen-und-daten/zementindustrie-in-deutschland (dostęp: 17.09.2021).
- [102] *prEN 197-6:2021 Cement with recycled building materials.*
- [103] *PN-B-06265:2018-10 Beton Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie normy PN-EN 206+A1:2016-12.*
- [104] *PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.*
- [105] *prPN-B-06265:2022 Beton Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie normy PN-EN 206+A2:2021-08.*
- [106] *PN-EN 1990:2004+A1:2008 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.*

- [107] Beton według normy PN-EN 206:2014, *Informator opr. przez zespół Działu Pełnomocnika Zarządu d. Badań i Rozwoju Produktów Grupy Góraźdze.*
- [108] *PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu - Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.*
- [109] *PN-EN 13263-1+A1:2010 Pyłkrzemionkowy do betonu - Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności.*
- [110] *PN-EN 15167-1:2007 Mielony granulowany żużel wielkopiecowy do stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie - Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.*
- [111] Technical Report CEN/TR 16639 Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept, 2014.
- [112] *PN-B-19707:2013-10 Cement - Cement specjalny - Skład, wymagania i kryteria zgodności.*
- [113] Strona internetowa: www.libet.pl/produkty/kostka-brukowa-akropol-colormix/ (dostęp: 09.11.2021).
- [114] Strona internetowa: www.monolityczne.com.pl/realizacje/najwiekszy-wezel-w-europie (dostęp: 13.12.2021).
- [115] Informator Góraźdze Cement Kruszywo Beton w ofercie grupy Góraźdze, 2018.
- [116] OST D-05.03.04 Nawierzchnia Betonowa, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, 2018.
- [117] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 7 stycznia 2021 DZ.U. 2021 Poz. 33.
- [118] *PN-EN 197-1:2012 Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.*
- [119] *PN-EN 196-2:2013-11 Metody badania cementu Część 2: Analiza chemiczna cementu.*
- [120] *PN-EN 451-1:2017-06 Metoda badania popiołu lotnego - Część 1: Oznaczanie zawartości wolnego tlenku wapnia.*
- [121] *PN-EN 1097-7:2008 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw - Część 7: Oznaczanie gęstości wypełniacza - Metoda piknometryczna.*
- [122] *PN-EN 196-6:2019-01 Metody badania cementu -- Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia.*
- [123] *PN-EN 933-9+A1:2013-07 Badania geometrycznych właściwości kruszyw - Część 9: Ocena zawartości drobnych cząstek - Badanie błękitem metylenowym.*
- [124] *PN-EN 13639:2017-1 Oznaczanie całkowitej zawartości węgla organicznego w wapieniu.*
- [125] *PN-EN 196-3:2016-12 Metody badania cementu - Część 3: Oznaczanie czasów wiązania i stałości objętości.*
- [126] *PN-EN 196-1:2016-07 Metody badania cementu - Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.*
- [127] *PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu.*
- [128] *PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw - Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego - Metoda przesiewania.*
- [129] *PN-EN 1097-1:2011 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw - Część 1: Oznaczanie odporności na ścieranie (mikro-Deval).*

- [130] *PN-EN 1097-8:2020-09 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw - Część 8: Oznaczanie polerowalności kamienia.*
- [131] *PN-EN 933-3:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw - Część 3: Oznaczanie kształtu ziarn za pomocą wskaźnika płaskości.*
- [132] *PN-EN 933-4:2008 Badania geometrycznych właściwości kruszyw - Część 4: Oznaczanie kształtu ziarn - Wskaźnik kształtu.*
- [133] *PN-EN 1097-6:2013-11 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw - Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości.*
- [134] *PN-EN 1097-2:2010 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw - Część 2: Metody oznaczania odporności na rozdrabnianie.*
- [135] *PN-B-06714-46:1992 Kruszywa mineralne - Badania - Oznaczanie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą szybką.*
- [136] *PN-EN 1367-1:2007 Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych - Część 1: Oznaczanie mrozoodporności.*
- [137] *PN-EN 1367-6:2008 Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych - Część 6: Mrozoodporność w obecności soli.*
- [138] *PN-EN 934-1:2009 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu - Część 1: Wymagania podstawowe.*
- [139] *PN-EN 1008:2004 Woda zarobowa do betonu - Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonów.*
- [140] *PN-EN 12350-6:2019-08 Badania mieszanki betonowej - Część 6: Gęstość.*
- [141] *PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej - Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożk.*
- [142] *PN-EN 12350-8:2019-08 Badania mieszanki betonowej - Część 8: Beton samozagęszczalny -- Badanie konsystencji metodą rozplywu stożka.*
- [143] *PN-EN 12350-10:2012 Badania mieszanki betonowej - Część 10: Beton samozagęszczalny -- Badanie metodą L-pojemnika.*
- [144] *PN-EN 12350-9:2012 Badania mieszanki betonowej - Część 9: Beton samozagęszczalny - Badanie metodą V-lejka.*
- [145] *PN-EN 12350-12:2012 Badania mieszanki betonowej - Część 12: Beton samozagęszczalny - Badanie metodą J-pierścienia.*
- [146] *PN-EN 12390-7:2019-08 Badania betonu - Część 7: Gęstość betonu.*
- [147] *PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań.*
- [148] *PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu - Metody badań - Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.*
- [149] *PN-B-06714-23:1984 Kruszywa mineralne Badania - Oznaczanie zmian objętościowych metodą Amslera.*

- [150] *PN-EN 12390-13:2021-12 Badania betonu - Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu.*
- [151] *PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej - Część 7: Badanie zawartości powietrza - Metody ciśnieniowe.*
- [152] Instrukcja ITB 455/2010.