

Stosowanie cementów wieloskładnikowych w budownictwie

Streszczenie

Produkcja cementu odpowiada za ok. 5% światowej antropogenicznej emisji dwutlenku węgla do atmosfery [1÷2]. Szacuje się, że produkcja tony klinkieru powoduje emisję do atmosfery około 800÷850 kg CO₂ [1]. Emisja pochodzi głównie z rozkładu węglanu wapnia (CaCO₃) – ok. 60% oraz ze spalania paliw w trakcie wypalania (syntezy) klinkieru portlandzkiego – ok. 40%. Ograniczenie tej emisji staje się coraz bardziej istotne w kontekście ocieplania się klimatu. W Polsce przemysł cementowy dzięki sukcesywnie prowadzonym od 1990 roku modernizacjom ograniczył emisję CO₂ na tonę cementu o ok. 40% [1]. Było to możliwe dzięki modernizacji procesu wypału klinkieru, wprowadzeniu do stosowania paliw alternatywnych w miejsce węgla oraz upowszechnieniu stosowania cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A, B oraz cementów hutniczych CEM III/A w miejsce cementu CEM I. Cementy wieloskładnikowe charakteryzują się tym, że zawierają oprócz klinkieru i regulatora czasu wiązania, tylko jeden nieklinkierowy składnik główny, którym przeważnie był popiół lotny krzemionkowy (V), granulowany żużel wielkopiecowy (S), a także w mniejszych ilościach wapień (L, LL).

Słowa kluczowe:

cementy wieloskładnikowe, składniki nieklinkierowe, CEM I, emisje

Abstract

Cement production accounts for about 5% of global anthropogenic carbon dioxide emissions to the atmosphere [1÷2]. It is estimated that the production of a ton of clinker emits about 800÷850 kg of CO₂ [1]. The emissions come mainly from the decomposition of calcium carbonate (CaCO₃) – about 60%, and from the combustion of fuels during the burning of Portland clinker – about 40%. Reducing these emissions is becoming increasingly important in the context of climate changing. In Poland, the cement industry, thanks to successive modernizations since 1990, has reduced CO₂ emissions per ton of cement by about 40% [1]. This was possible due to the modernization of the clinker burning process, the introduction of alternative fuels in place of coal, and the widespread use of cements with non-clinker main components instead of CEM I Portland cements. Mainly these were CEM II/A, B multi-component Portland cements and CEM III/A metallurgical cements. They were characterized by the fact that they contained, in addition to the clinker and the setting time regulator, only one non-clinker main ingredient, which was mostly silica fly ash (V), granulated blast furnace slag (S), and in smaller amounts of limestone (L, LL).

Keywords:

multi-component Portland cements, non-clinker main ingredient, CEM I, emissions

nu wapnia (CaCO₃) – ok. 60% oraz ze spalania paliw w trakcie wypalania (syntezy) klinkieru portlandzkiego – ok. 40%. Ograniczenie tej emisji staje się coraz bardziej istotne w kontekście ocieplania się klimatu. W Polsce przemysł cementowy dzięki sukcesywnie prowadzonym od 1990 roku modernizacjom ograniczył emisję CO₂ na tonę cementu o ok. 40% [1]. Było to możliwe dzięki modernizacji procesu wypału klinkieru, wprowadzeniu do stosowania paliw alternatywnych w miejsce węgla oraz upowszechnieniu stosowania cementów z nieklinkierowymi składnikami głównymi zamiast cementów portlandzkich CEM I, głównie były to cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A, B oraz cementy hutnicze CEM III/A. Charakteryzowały się one tym, że zawierały oprócz klinkieru i regulatora czasu wiązania, tylko jeden nieklinkierowy składnik główny, którym przeważnie był popiół lotny krzemionkowy (V), granulowany żużel wielkopiecowy (S), a także w mniejszych ilościach wapień (L, LL). Jednakże popiół lotny i granulowany żużel wielkopiecowy są produktami powstającymi, odpowiednio, przy produkcji energii elektrycznej oraz surówki żelaza w wielkim piecu. Procesy te również charakteryzują się dużą emisją CO₂, odpowiednio 745 kg CO₂/MWh [3] oraz 1850 kg CO₂/t_{stali} [4]. W związku z tym odchodzi się od produkcji energii elektrycznej z paliw kopalnych oraz optymalizuje się proces wytwarzania surówki żelaza lub stosuje się inne, mniej emisyjne procesy produkcji surówki żelaza i stali. Skutkuje to ograniczoną dostępnością popiołu lotnego i granulowanego żużla wielkopiecowego, a w dłuższej perspektywie może generować problemy z pozyskaniem odpowiedniej ilości dla krajowego zapotrzebowania. Oczywiście obserwowany jest również wzrost kosztów pozyskania nieklinkierowych składników głównych. Jednym z rozwiązań tego problemu jest produkcja i szersze stosowanie w budownictwie cementów wieloskładnikowych, tj. zawierających więcej niż jeden nieklinkierowy składnik główny cementu przy zachowaniu właści-

1. Wprowadzenie

Produkcja cementu odpowiada za ok. 5% światowej antropogenicznej emisji dwutlenku węgla do atmosfery [1÷2]. Szacuje się, że produkcja tony klinkieru powoduje emisję do atmosfery około 800÷850 kg CO₂ [1]. Emisja pochodzi głównie z rozkładu węgla-

Tabela 1. Rodzaje i skład cementów wieloskładnikowych wg PN-EN 197-1 i PN-EN 197-5

Rodzaj	Nazwa	Symbol	Składniki główne											Składniki drugorzędne	
			klinkier	żużel wielkopiecowy	pucolana		popiół lotny		Wapień		pył krzemionkowy	łupek palony			
					naturalna	naturalna wypalana	krzemionkowy	wapienny	L	LL			D		T
			K	S	P	Q	V	W	L	LL	D	T			
CEM II	cement portlandzki wieloskładnikowy	CEM II/A-M	81÷94	<----->			12÷20							0÷5	
		CEM II/B-M	65÷79	<----->			21÷35							0÷5	
		CEM II/C-M	50-64	<----->			36÷50							0÷5	
CEM V	cement wieloskładnikowy	CEM V/A	40÷64	18÷30	<-----18÷30----->				-	-	-	-	-	0÷5	
		CEM V/B	20÷38	31÷50	<-----31÷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

wości użytkowych obecnie stosowanych cementów. W niniejszym artykule omówiono właściwości oraz przykłady stosowania w budownictwie cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A-M (S-LL) 52,5N, CEM II/B-M (S-V) 42,5N oraz cementu wieloskładnikowego CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA.

2. Możliwości kształtowania składu cementów wieloskładnikowych

Aktualne normy dotyczące cementu PN-EN 197-1:2012 [5] oraz PN-EN 197-5:2021-7 [6] dają szerokie możliwości kształtowania składu cementów wieloskładnikowych (tabela 1). Do najczęściej obecnie stosowanych, obok klinkieru portlandzkiego, składników głównych cementu zaliczamy granulowany żużel wielkopiecowy (S), popiół lotny krzemionkowy (V) oraz wapień (L, LL). Dostępność granulowanego żużla wielkopiecowego oraz popiołu lotnego krzemionkowego (V), a także wapiennego (W) jest coraz bardziej ograniczona. Składniki takie jak pył krzemionkowy (D), pucolana naturalna (P) lub tupek palony (T) są dostępne w ograniczonym zakresie i w warunkach polskich nie stanowią alternatywy dla obecnie stosowanych nieklinkierowych składników głównych cementu. Ze względu na swoją dostępność alternatywą taką są materiały ilaste (gliny i ity), które po odpowiednim wyselekcjonowaniu, uśrednieniu oraz wyprażeniu mogłyby być stosowane w składzie cementu jako pucolana naturalna wypalana (Q) [7]. Wymagania normowe dla pucolan naturalnych wypalanych dotyczą zawartości reaktywnej krzemionki ($\geq 25\%$ masy). Należy jednak pamiętać, że sam proces prażenia glin wymaga wybudowania nowych instalacji (wysokie nakłady inwestycyjne) i wiąże się z emisją CO_2 , która jest jednak niższa niż w przypadku produkcji klinkieru portlandzkiego. Należy jednak zaznaczyć, że dostępność w Polsce glin odpowiedniej jakości, tj. z wysoką zawartością kaolinitu, jest ograniczona.

Cementy z pucolanami (Q) wyróżniają się wyższą wodozadržnością niż cementy z popiołem lotnym krzemionkowym (V), czy granulowanym żużlem wielkopiecowym (S), a także zmienną barwą oraz zwiększoną podatnością na karbonatację [8]. Zdaniem autorów najbardziej perspektywicznym rozwiązaniem jest szersze stosowanie dwóch nieklinkierowych składników głównych, np. w następujących kombinacjach: S-V, S-LL i V-LL, ze względu na:

- jak najbardziej zbliżone właściwości użytkowe z obecnie stosowanymi cementami,
- podobną (CEM II/A,B-M) lub obniżoną (CEM II/C-M, CEM V/A,B, CEM VI) emisyjność w stosunku do cementów obecnie produkowanych,
- elastyczność w możliwości kształtowania składu ze względu na dostępność nieklinkierowych składników głównych.

Rys. 3. Wpływ temperatury dojrzewania na wytrzymałość zaprawy cementowej po 2 dniach twardnienia

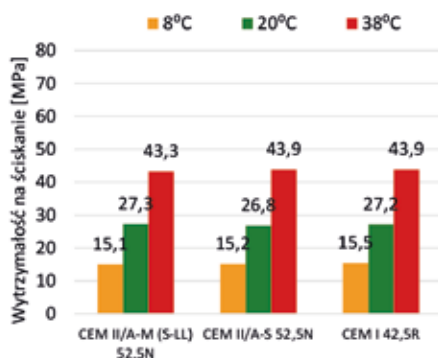
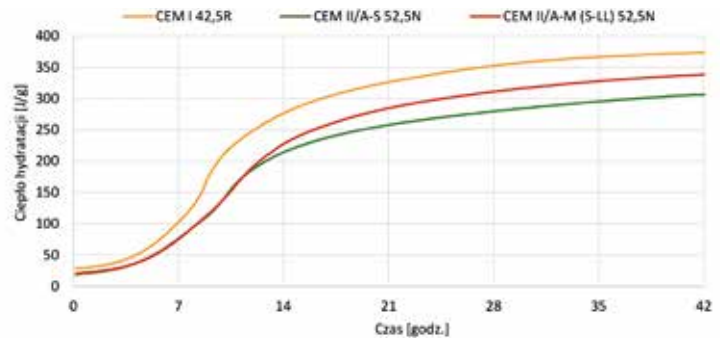


Tabela 2. Właściwości cementu CEM I 42,5R, CEM II/A-S 52,5N i CEM II/A-M (S-LL) 52,5N

Właściwość	Jednostka	CEM I 42,5R	CEM II/A-S 52,5N	CEM II/A-M (S-LL) 52,5N
Początek czasu wiązania	[min]	210	202	165
Woda do konsystencji normowej	[%]	26,9	29,1	29,8
Gęstość	[g/cm ³]	3,13	3,10	3,07
Powierzchnia właściwa	[cm ² /g]	3902	4490	4320



Rys. 1. Ciepło hydratacji cementów CEM I 42,5R, CEM II/A-S 52,5N i CEM II/A-M (S-LL) 52,5N

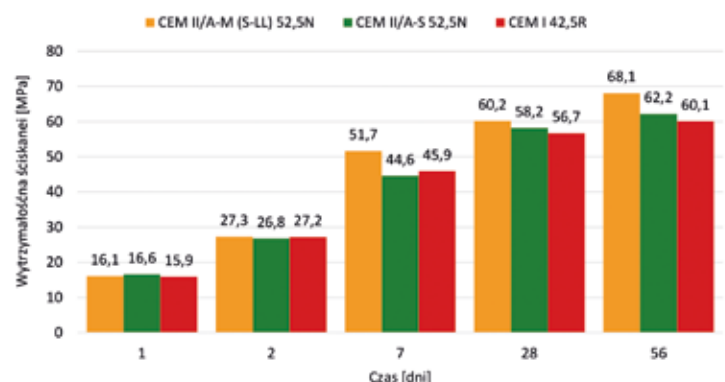
3. Właściwości cementów wieloskładnikowych

3.1. Cement z granulowanym żużlem wielkopiecowym i wapieniem (S-LL)

Zastosowanie w składzie cementu, oprócz granulowanego żużla wielkopiecowego, także wapienia niesie ze sobą pewne korzyści. Głównie z uwagi na lepszą mielność (mniejszą twardość) wapienia w porównaniu do pozostałych składników. Rozmielony wapień lokuje się w drobnych frakcjach cementu i spełnia funkcję efektywnego mikrowypełniacza w strukturze stwardniałej matrycy cementowej [9÷16]. Przykładem cementu zawierającego wapień i granulowany żużel wielkopiecowy jest cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL) 52,5N, o właściwościach fizycznych zbliżonych do cementu portlandzkiego żużlowego CEM II/A-S 52,5N i cementu portlandzkiego CEM I 42,5R (tabela 2).

Ziarna drobno zmielonego wapienia mogą stanowić zarodki krystalizacji wodorotlenku wapniowego (efekt nukleacyjny), co przyspiesza hydratację faz

Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie cementów CEM I 42,5R, CEM II/A-S 52,5N i CEM II/A-M (S-LL) 52,5N



Rys. 4. Wpływ wskaźnika w/c na wytrzymałość wczesną zaprawy cementowej po 2 dniach twardnienia

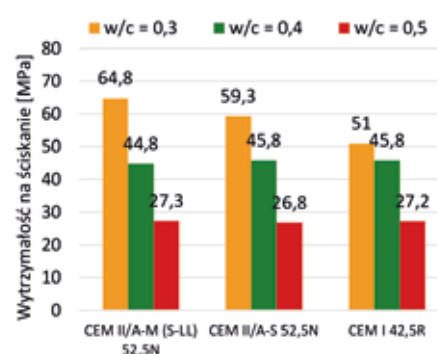


Tabela 3. Receptury betonu

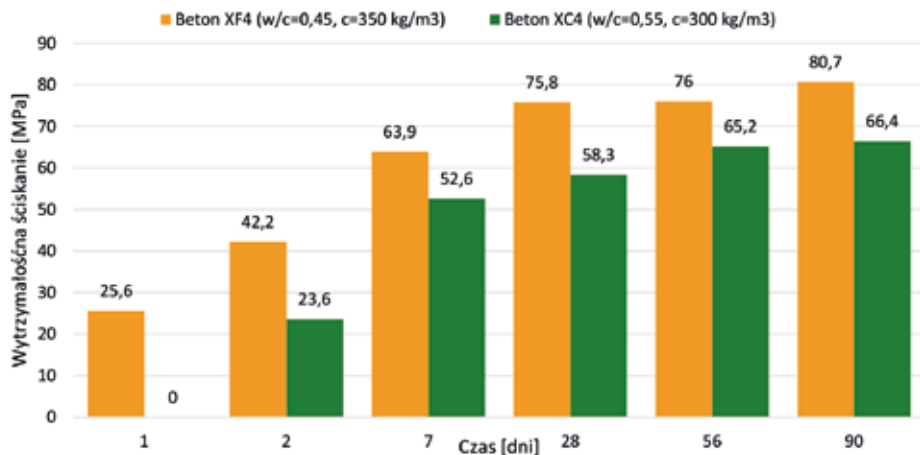
Składnik	Beton XC4	Beton XF4
	Ilość [kg/m ³]	
Piasek 0/2 mm	705	645
Żwir 2/8 mm	485	-
Żwir 8/16 mm	690	-
Granit 2/8 mm	-	445
Granit 8/16 mm	-	635
Cement	300	350
Woda	165	157,5
Domieszka napowietrzająca	-	0,15% m.c.
Zawartość powietrza	2,8%	5,5%

cementowych (głównie alitu) [10÷13] i znajduje odzwierciedlenie na krzywej kalorymetrycznej cementu (rys. 1), gdzie obserwuje się większą ilość wydzielanego ciepła w trakcie hydratacji cementu CEM II/A-M (S-LL) 52,5N niż w przypadku cementu CEM

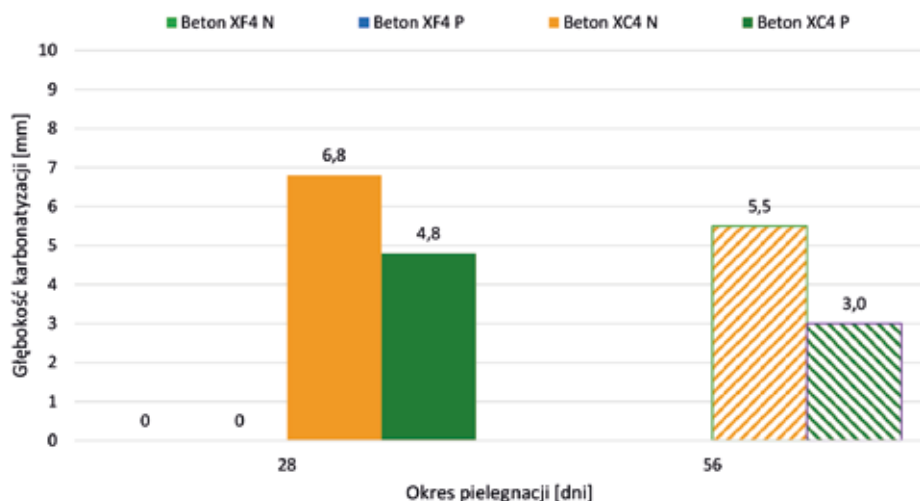
Tabela 4. Mrozoodporność betonu z cementem CEM II/A-M (S-LL) 52,5N

Właściwość		Beton XF4	Wymaganie
Struktura napowietrzenia: - zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3 mm (A300) - wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie, L mm		1,5% 0,190	≥ 1,5% ≤ 0,200
Mrozoodporność zwykła F200*	Pielęgnacja 28 dni – spadek wytrzymałości	4,9% ¹⁾	≤ 20%
	Pielęgnacja 56 dni – spadek wytrzymałości	3,8% ¹⁾	
Mrozoodporność w obecności soli odładowujących	Pielęgnacja 28 dni	złuszczenie po 28 cyklach m ₂₈	0,00 kg/m ²
		złuszczenie po 56 cyklach m ₅₆	0,08 kg/m ²
¹⁾ Próbkę pielęgnowaną 28 i 56 dni nie wykazywały spękań, ani ubytku masy ²⁾ m ₂₈ – wartość średnia ≤ 0,50 kg/m ² ; m ₅₆ – wartość średnia ≤ 1,0 kg/m ² , przy czym żaden pojedynczy wynik > 1,0 kg/m ² ; Stopień ubytku m ₅₆ /m ₂₈ ≤ 2			

Rys. 5. Wytrzymałość betonów z cementem CEM II/A-M (S-LL) 52,5N



Rys. 6. Głębokość karbonatyzacji betonów z cementem CEM II/A-M (S-LL) 52,5N (N – pielęgnacja 7 dni w wodzie, następnie w temp. 20°C przy wilgotności 50÷60% do czasu badania, P – pielęgnacja 28/56 dni w wodzie, następnie 14 dni w temp. 20°C przy wilgotności 50÷60%)



II/A-S 52,5N. W literaturze można także spotkać wyniki badań wskazujące na aktywność chemiczną zmielonego węgla wapnia CaCO₃ w stosunku do faz glinianowych klinkieru portlandzkiego. Produktem reakcji jest wówczas uwodniony karboglinań wapniowy C₃A•CaCO₃•11H₂O, który osadzając się w porach uszczelnia strukturę zaczynu, co korzystnie wpływa na wytrzymałość cementu, zarówno jeśli chodzi o wytrzymałość wczesną (2-dniową), jak i normową po 28 dniach (rys. 2.). Jednak przy zawartości wapienia > 15% obserwuje się spadek wytrzymałości w dłuższych okresach twardnienia cementu [14÷15]. Na rys 3 i 4 pokazano wpływ temperatury oraz współczynnika wodno-cementowego (w/c) na wytrzymałości wczesne cementów. Przy niższym w/c cement CEM II/A-M (S-LL) 52,5N charakteryzuje się zbliżoną wytrzymałością do cementów CEM I 42,5R oraz CEM II/A-S 52,5N.

3.2. Właściwości betonu z użyciem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/A-M (S-LL) 52,5N

W tabeli 3 przedstawiono skład badanych betonów z cementem portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/A-M (S-LL) 52,5N, które spełniały wymagania zawarte w normie PN-EN 206 [17] wraz z krajowym uzupełnieniem PN-B-06265 [18] dla klas ekspozycji XC4 i XF4. Prawidłowo zaprojektowany i wykonany beton z tym cementem charakteryzuje się wysoką dynamiką narastania wytrzymałości wczesnych oraz wysoką wytrzymałością po 28 dniach dojrzewania (rys. 5), a także bardzo dobrą odpornością na karbonatyzację (rys. 6) oraz bardzo dobrą odpornością na zamrażanie-rozmrażanie (beton XF4) zarówno w wodzie – stopień F200,

jak i w obecności soli odladzających – kategoria FT 2 (tabela 4). Ze względu na swoje właściwości cement CEM II/A-M (S-LL) 52,5N znajduje zastosowanie w produkcji betonów zwykłych, wysokowytrzymałościowych, prefabrykacji, a także wg najnowszych wytycznych GDDKiA w betonie konstrukcyjnym w drogowych obiektach inżynierskich

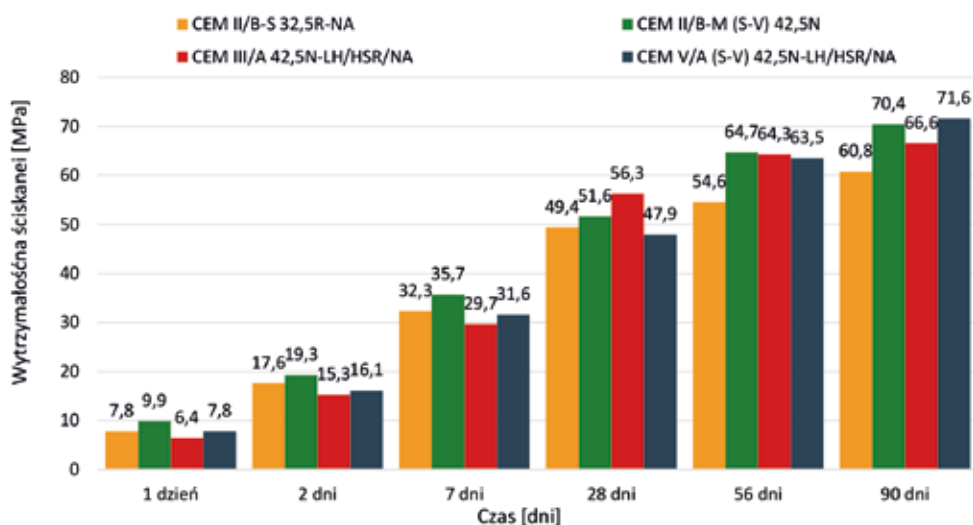
3.3. Cementy z granulowanym żużlem wielkopieczowym i popiołem lotnym krzemionkowym (S-V)

Właściwości chemiczne i fizyczne cementów zawierających granulowany żużel wielkopieczowy oraz popiół lotny zestawiono w tabeli 5. Cementy wieloskładnikowe (popiolowo-żużłowe, S-V) CEM II/B-M (S-V) 42,5N i CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA charakteryzują się podobnym początkiem czasu wiązania do cementów zawierających tylko granulowany żużel wielkopieczowy, tj. cementu CEM II/B-S 32,5R-NA oraz CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA. Natomiast wodożądność cementów zależy głównie od stopnia ich zmielenia (powierzchni właściwej). Cementy zawierające popiół lotny krzemionkowy i granulowany żużel wielkopieczowy CEM II/B-M (S-V) 42,5N i CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA charakteryzują się nieznacznie wyższą wytrzymałością wczesną (jedno- i dwudniową) w stosunku do cementu CEM II/B-S 32,5R-NA oraz cementu hutniczego CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA (rys. 7), co wynika z odpowiednio wyższej klasy wytrzymałości i większej zawartości klinkieru portlandzkiego. W okresie normowym (po 28 dniach) cementy wieloskładnikowe CEM II/B-M (S-V) 42,5N i CEM

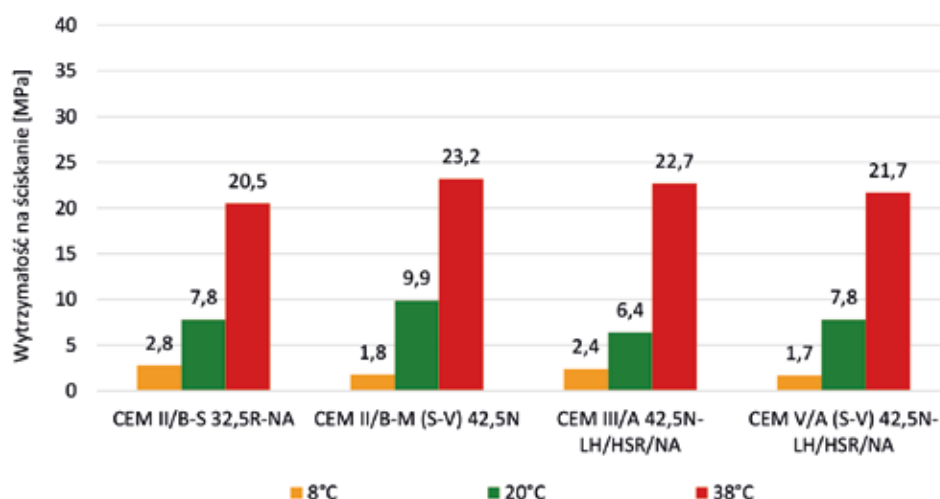
Właściwość	Jednostka	CEM II/B-S 32,5R-NA	CEM II/B-M (S-V) 42,5N	CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA
Początek czasu wiązania	[min]	255	225	240	250
Woda do konsystencji normowej	[%]	27,8	29,9	34,2	29,4
Gęstość	[g/cm ³]	3,06	2,98	3,03	2,90
Powierzchnia właściwa	[cm ² /g]	4030	4280	4440	4175

V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA charakteryzują się wytrzymałością zbliżoną do cementu CEM II/B-S 32,5R. Cechą charakterystyczną cementów wieloskładnikowych S-V jest znaczny przyrost wytrzymałości w dłuższych terminach dojrzewania, po 56 czy 90 dniach, co jest rezultatem postępującej reakcji pucolanowej z udziałem popiołu lotnego, której efekty uwidaczniają się w dłuższych okresach dojrzewania cementu i betonu (rys. 8). Tym samym CEM II/B-M (S-V) 42,5N i CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA osiągają wytrzymałość na poziomie zbliżonym do cementu hutniczego CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA. Wytrzymałość na ściskanie cementów zawierających popiół lotny oraz granulowany żużel wielkopieczowy, szczególnie w początkowym okresie dojrzewania (po 1 dniu), zależy od temperatury otoczenia w okresie dojrzewania/twardnienia, co jest szczególnie istotne ze względu na możliwość planowania rozdeskowania szalunków oraz ustalenia właściwego czasu pielęgnacji betonu. Cementy te charakteryzują się niższą dynamiką narastania wytrzymałości w warunkach obniżonych temperatur,

Tabela 5. Właściwości cementu CEM I 42,5R, CEM III/A-S 52,5N i CEM II/A-M (S-LL) 52,5N

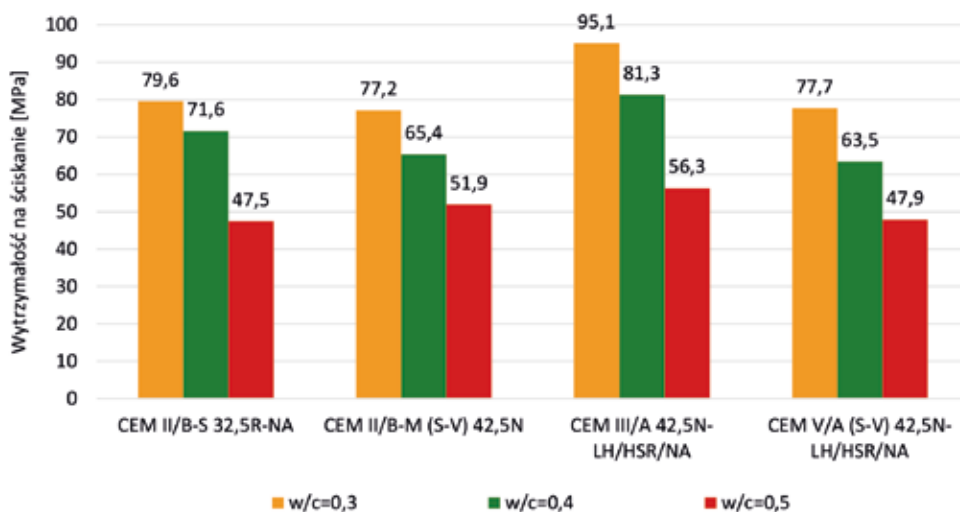


Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie cementów CEM II/B-S 32,5R, CEM II/B-M (S-V) 42,5N, CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA i CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA



Rys. 8. Wpływ temperatury dojrzewania na wytrzymałość cementu po 1 dniu twardnienia

Rys. 9. Wpływ temperatury dojrzewania na wytrzymałość cementu po 28 dniach twardnienia



co wymaga wydłużenia okresu pielęgnacji lub stosowania efektywnych domieszek przyspieszających proces wiązania i twardnienia. Najlepszym sposobem wykorzystania właściwości cementów wieloskładnikowych w kompozytach cementowych jest efektywne obniżenie współczynnika w/c (rys. 9).

Cementy wieloskładnikowe żuźlowo-popiołowe (S-V) charakteryzują się podwyższoną odpornością na korozyjne działanie środowisk agresywnych chemicznie (rys. 10). Odporność na korozję chemiczną kompozytów cementowych żuźlowo-popiołowych jest wynikiem zmian zachodzących w mikrostrukturze, tj.:

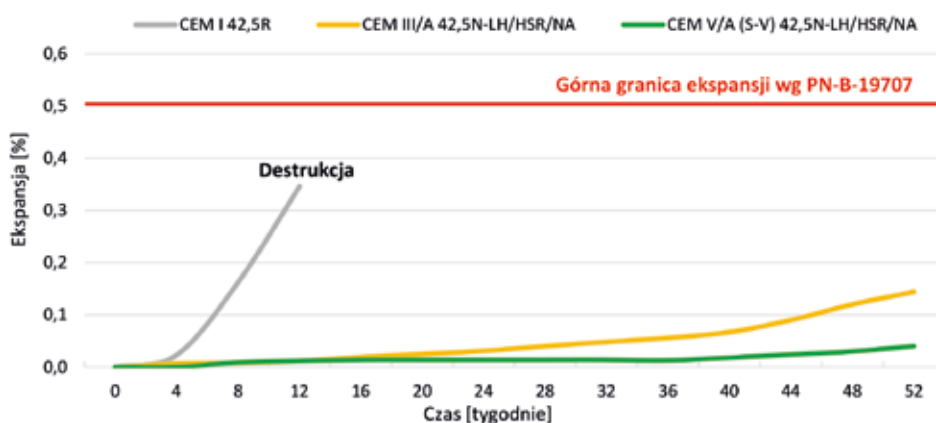
- ograniczeniem zawartości faz klinkierowych podatnych na korozję, głównie glinianu trójwapiowego (C3A), poprzez zmniejszenie udziału klinkieru na rzecz popiołu lotnego i granulowanego żuźla wielkopieczowego
- zmniejszeniem zawartości portlandytu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w stwardniałej matrycy, który jest podatny na korozję chemiczną pod wpływem różnych czynników agresywnych, zwłaszcza gdy tworzy sku-

pienia kryształów o znacznych rozmiarach lub otoczki na ziarnach kruszywa

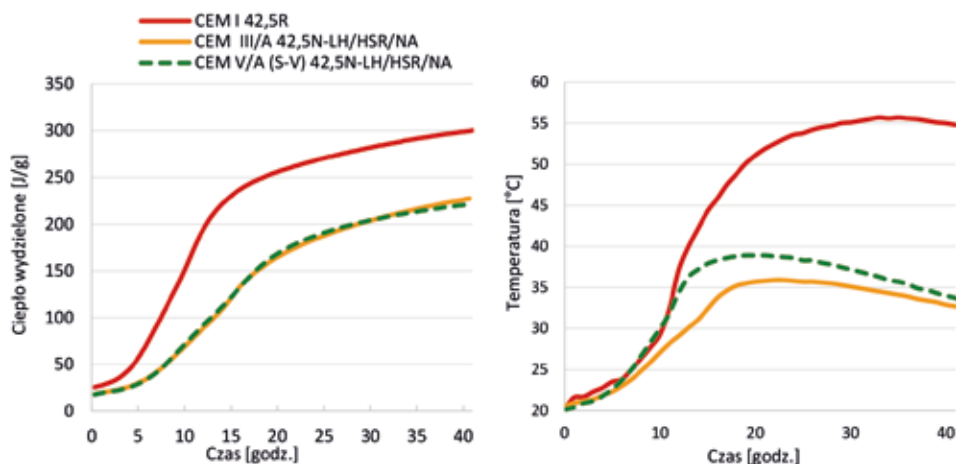
- przebiegiem reakcji pucolanowej z udziałem popiołu lotnego i hydratacji żuźla wielkopieczowego, z utworzeniem produktów hydratacji szczelnie wypełniającego dostępną przestrzeń w strukturze matrycy, o dobrej przyczepności do kruszywa i zbrojenia, odznaczającego się niewielką własną porowatością, przez co dostęp wody czy mediów agresywnych do wnętrza betonu jest ograniczony
- doszczelnienie struktury przez niezhydratyzowane cząstki popiołu lub drobno zmielonego granulowanego żuźla wielkopieczowego, co również utrudnia dyfuzję jonów agresywnych.

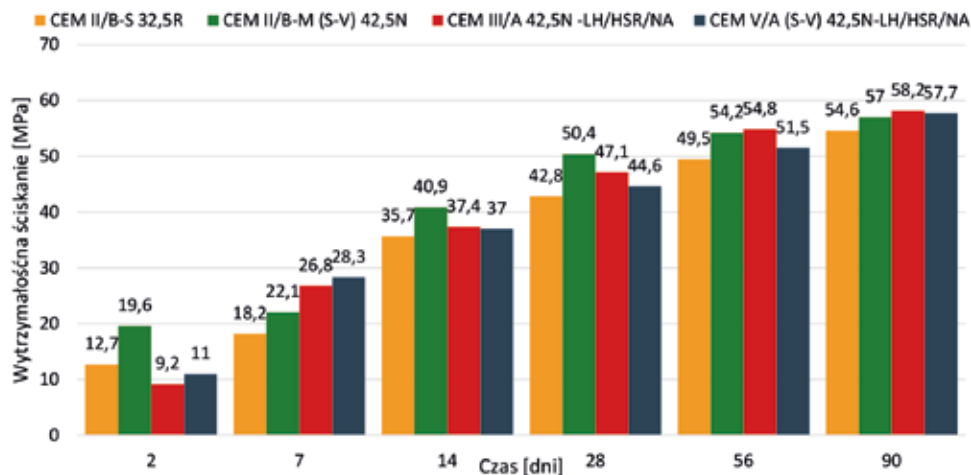
Cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA charakteryzuje się niskim ciepłem hydratacji (LH), co przekłada się w betonie na relatywnie niskie temperatury maksymalne i gradient temperatury $<20^\circ\text{C}$, nawet przy zawartości cementu 350 kg/m^3 (raczej niespotykanych w be-

Rys. 10. Odporność na agresję siarczanową wyrażona jako ekspansja zapraw cementowych w roztworze Na_2SO_4



Rys. 11. Ciepło hydratacji cementów (po lewej) i rozwój temperatury betonu w warunkach semi-adiabacyjnych ($w/c = 0,5$, zaw. cementu = 350 kg/m^3)





Rys. 12. Wytrzymałość na ściskanie betonu XC4

tonach masywnych). Predysponuje to cement CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA do stosowania w elementach masywnych konstrukcji betonowych, np. fundamenty masywne, zapory i jazy wodne, przyczółki mostowe itp.

Na rys. 12 porównano wytrzymałość na ściskanie betonów z cementami wieloskładnikowymi S-V CEM II/B-M (S-V) 42,5N i CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA z wytrzymałością betonu z cementem hutniczym CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA (zawierającym tylko granulowany żużel wielkopiecowy) w tej samej ilości (tabela 3).

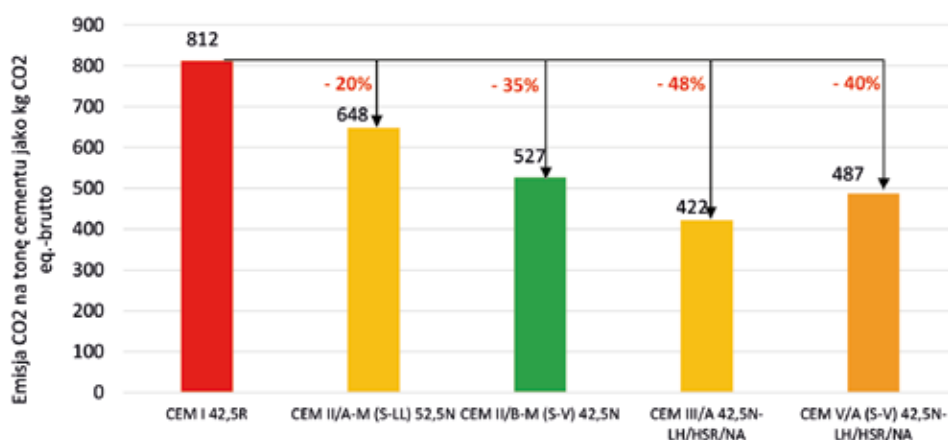
4. Cementy wieloskładnikowe, a zrównoważone budownictwo

W kontekście zachodzących zmian klimatycznych coraz istotniejszy staje się wpływ wykorzystywanych materiałów na środowisko, który jest utożsamiany głównie z poziomem emisji CO₂. Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL) 52,5N, przy tych samych właściwościach użytkowych jak cement portlandzki CEM I 42,5R charakteryzuje się o 20% mniejszą emisją CO₂ (rys. 13). Natomiast stosowanie cementów wieloskładnikowych CEM II/B-M (S-V) 42,5N i CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA pozwala na obniżenie emisyjności kompozytów cementowych odpo-

wiednio o 35% i 48% w stosunku do cementu portlandzkiego CEM I 42,5R (rys. 13). W porównaniu do cementu hutniczego CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA, ich emisyjność jest nieznacznie wyższa, jednak stanowią one alternatywę w przypadku mniejszej dostępności granulowanego żużla wielkopiecowego jako składnika głównego cementu.

5. Przykłady zastosowań cementów wieloskładnikowych w budownictwie

Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-M (S-V) 42,5N i cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA, zgodnie z wymaganiami zwartymi w normie PN-EN 206 wraz z krajowym uzupełnieniem PN-B-06265, mogą być stosowane niemal w każdej klasie ekspozycji, wyjątek stanowią klasy XF3 i XF4 w przypadku cementu CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA. Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-M (S-V) 42,5N może być z powodzeniem stosowany do wykonawstwa posadzek betonowych. Na rys. 14 przedstawiono przykłady posadzek betonowych wykonanych z betonu klasy C 30/37 z cementem CEM II/B-M (S-V) 42,5N o powierzchni ok 40 000 m² w miejscowości Komorniki k/Poznań oraz 50 000 m² w miejscowości Gołuski k/Poznań.



Rys. 13. Emisyjność cementów CEM II/B-M (S-V) 42,5 i CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA w porównaniu do cementów CEM I 42,5R i CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA [19]



Rys. 14. Posadzki z cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/B-M (S-V) 42,5N: posadzka o pow. 40 000 m² (po lewej), posadzka o powierzchni 50 000 m² (po prawej)



Rys. 15. Fundament młyna nr 4 w Cementowni Górażdże

Już w roku 2011 wykonano w Cementowni Górażdże fundament młyna nr 4 z wykorzystaniem betonu z cementem wieloskładnikowym CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA (rys. 15). W projekcie konstrukcyjnym do wykonania wszystkich elementów wskazany został beton klasy wytrzymałości C30/37 (deklarowanej po 56 dniach dojrzewania) dla klasy ekspozycji XC3. Łączna objętość fundamentu wynosiła 5090 m³.

6. Podsumowanie

Właściwości cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A-M (S-LL) 52,5N, CEM II/B-M (S-V) 42,5N oraz cementów wieloskładnikowych CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA, poprzez odpowiedni dobór składników pod kątem jakościowym i ilościowym oraz odpowiedni stopień przemiału, charakteryzują się właściwościami zbliżonymi do cementów portlandzkich CEM I, czy cementów zawierających w swoim składzie tylko granulowany żużel wielkopiecowy tj. cementów portlandzkich żużlowych CEM II/A,B-S, czy cementów hutniczych CEM III/A. Szczególnie istotne znaczenie, z punktu widzenia kształtowania właściwości wytrzymałościowych betonów zawierających cementy wieloskładnikowe, ma współczynnik w/c. Zaprawy i betony wykonane z cementów CEM II/A-M (S-LL) 52,5N, CEM II/B-M (S-V) 42,5N oraz CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA charakteryzują się zbliżoną trwałością w porównaniu do właściwości cementów zawierających tylko jeden składnik nieklinkierowy. Cementy wieloskładnikowe przy tych samych właściwościach użytkowych charakteryzują się też niższą emisyjnością CO₂, w porównaniu z cementami portlandzkimi CEM I.

dr inż. Maciej Batóg
mgr inż. Jakub Bakalarz,
dr inż. Katarzyna Synowiec,
dr inż. Damian Dziuk
Centrum Technologiczne Betotech sp. z o.o

Tabela 6. Receptura betonów stosowanych przy budowie fundamentu młyna nr 4

Składnik	Zawartość [kg/m ³]	
Piasek 0/2	672	726
Żwir 2/8	470	481
Żwir 8/16	325	588
Żwir 16/31,5	352	----
CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA	290	305
Popiół lotny	75	75
Woda	151	155
Superplastyfikator	2,47	2,44
Plastyfikator	1,16	1,22
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]:		
- 28 dni	36,5	38,6
- 56 dni	47,1	50,2

Literatura

1. *Beton niskoemisyjny materiał budowlany, praca zbiorowa pod redakcją dr inż. Bożeny Środy, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2021, ISBN: 978-83-61331-42-1, <https://www.polskicement.pl/wp-content/uploads/2021/10/Beton-niskoemisyjny-material-budowlany-low.pdf>*
2. *Huntzinger, D.N., Eatmon, T.D., A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. J. Clean. Prod. 17, 2009, pages 668–675.*
3. *Wskaźniki emisyjności CO₂, SO₂, NO_x, CO i pyłu całkowitego dla energii elektrycznej na podstawie informacji zawartych w Krajowej bazie o emisjach gazów cieplarnianych i innych substancji za 2020 rok, Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami - Zespół Zarządzania Krajową Bazą, https://kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/wskazniki_emisyjnosci/Wskazniki_emisyjnosci_grudzien_2021.pdf*
4. *Raport „Sustainable steel”, World Steel Association, 2021, <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-Indicators-2021-and-our-sustainability-journey.pdf>*

Tabela 13. Obszary zastosowań cementów zgodnych z EN 197-1 lub PN-B 19707 do produkcji betonu w poszczególnych klasach ekspozycji

(✓ – akceptowany zakres stosowania, ✗ – brak możliwości stosowania, ● – dopuszczalny zakres stosowania, wymaga uwagi)

Rodzaj cementu	Klasy ekspozycji																			Interakcja ze stromi sprężającej	
	Brak zagrożenia agresją środowiska lub zagrożenia korozją	Korozja zbrojenia									Agresja wobec betonu										
		Korozja spowodowana karbonatyzacją					Korozja wywołana chlorkami				Zamrażanie/rozmarzanie				Środowisko chemicznie agresywne			Agresja wywołana ścieraniem			
							niepochodzącymi z wody morskiej		pochodzącymi z wody morskiej												
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2 ¹⁾	XA3 ¹⁾	XM1	XM2	XM3	
CEM II/A-M (S-LL) 52,5N	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CEM II/B-S 32,5R-NA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CEM II/B-M (S-V) 42,5N	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CEM III/A 42,5N-LH/SR/NA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	● ³⁾	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA ⁴⁾	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗

¹⁾ W klasach ekspozycji XA2 i XA3 – w przypadku agresji chemicznej wywołanej siarczanami (z wyjątkiem pochodzenia morskiego) – stosuje się cement odporny na siarczany (SR) zgodny z wymaganiami normy EN 197-1 lub cement odporny na siarczany (HSR) zgodny z wymaganiami normy PN-B-19707.

²⁾ Klasa wytrzymałości cementu ≥ 42,5 lub klasa wytrzymałości cementu ≥ 32,5 R z zawartością granulowanego żużla wielkopiecowego ≤ 50 % (masowo), wymagane napowietrzenie

³⁾ Dopuszcza się stosowanie cementu hutniczego CEM III/B wyłącznie w przypadku elementów konstrukcji budowlanych narażonych na działanie wody morskiej, wymagane napowietrzenie, przy: w/c ≤ 0,45 ; minimalna klasa wytrzymałości betonu C35/45 i zawartość cementu ≥ 340 kg/m³.

⁴⁾ Cementy do wytwarzania betonu według niniejszej normy mogą zawierać w swoim składzie tylko popioły lotne z maksymalnie 5,0 % stratą prażenia (LOI).

5. PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
6. PN-EN 197-5:2021-07 Cement – Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI
7. Giergiczny Z., *Nowe cementy i technologie wytwarzania spoiw alternatywnych, Dni betonu. Tradycja i nowoczesność. Konferencja, Wisła, 8-10 października 2012. Red. P. Kijowski, J. Deja. Kraków : Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2012, s. 513-525*
8. B.B Sabir, J. Bai, *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, Cement and Concrete Composites. Volume 23, Issue 6, December 2001, Pages 441-454*
9. Giergiczny Z., Piechówka M., Sokołowski M., *Właściwości cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/A,B-M zawierającego wapieni (L, LL), Budownictwo, Technologia, Architektura nr 3/2009,*
10. Lothenbach, B., Saout, G. Le, Gallucci, E., Scrivener, K., *Influence of limestone on the hydration of Portland cements, Cem. Concr. Res. (2008) 848–860.*
11. Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., Lothenbach, B., *Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements, Cem. Concr. Compos. 46 (2014) 99–108. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946513001923> (udostępniono 12 listopad 2018).*
12. Kurdowski, W., *Chemia cementu i betonu, PWN, Warszawa, 2010. doi: 10.1348/014466604322915971.*
13. Matschei, T., Lothenbach, B., Glasser, F.P., *The role of calcium carbonate in cement hydration, Cem. Concr. Res. 37 (2007) 551–558. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2006.10.013*
14. Gołaszewska M., *Wpływ wapienia na kształtowanie się właściwości cementów wieloskładnikowych wapienno-zużłowych, Rozprawa doktorat*
15. P. Boos, R. Hårdtl, *Experience report Portland limestone cement. Report HeidelbergCement Technology Center, 2004*
16. Ch. Muller, K. Severins, *Durability of concrete made with Portland-limestone and Portland-composite cements CEM II-M (S-LL), Concrete Technology Reports 2004–2006, pp. 29–53*
17. PN-EN 206:2014-04 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
18. PN-B-06265:2018-10 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12
19. Deklaracja środowiskowa III typu – EPD cementy CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V produkowane w Polsce, Stowarzyszenie Producentów Cementu, data wystawienia 1.06.2020, <https://www.polskicement.pl/wp-content/uploads/2021/12/EPD-Deklaracja-srodowiskowa-8-stron.pdf>

Brak doświadczeń nie jest przeszkodą w budowie dróg betonowych

Ponad 300 uczestników wzięło udział w V Podkarpackiej Konferencji Drogowej „Drogi betonowe w Polsce”, która 2 czerwca 2022 r. odbyła się na Politechnice Rzeszowskiej. Organizatorem konferencji był Cement Ożarów przy współudziale Stowarzyszenia Producentów Cementu.

Konferencja odbywała się pod patronatem Prezydenta Miasta Rzeszowa, Wojewody i Marszałka Województwa Podkarpackiego. W imieniu organizatorów spotkanie otworzyli m.in. Marek Surowiec, członek zarządu i dyrektor ds. strategii Cement Ożarów SA i prof. Grzegorz Bajorek z Politechniki Rzeszowskiej.

– Tematem konferencji są drogi betonowe. Samorządowców i społeczeństwo interesuje to, by drogi, które będą budowane, nie były zbyt często remontowane. Mam nadzieję, że podczas konferencji zostanie wypracowane rozwiązanie, które sprawi, że eksploatacja dróg będzie przyjazna dla samorządów – mówiła Jolanta Kaźmierczak, wiceprezydent Miasta Rzeszowa.

Bogdan Tarnawski, dyrektor GDDKiA Oddział Rzeszów, mówił o inwestycjach drogowych prowadzonych na terenie Podkarpacia. Do końca dekady oddział ma do realizacji inwestycje wartości 20 mld złotych. Nawierzchnie betonowe na terenie oddziału są eksploatowane od 2013 r. na odcinku autostrady A4 Radymno – Korczowa, na długości 4,54 km, przed granicą z Ukrainą.

Dr Maciej Gruszczyński z Politechniki Krakowskiej, reprezentujący Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego, mówił o znaczeniu betonu w budownictwie infrastrukturalnym, a także o nowych – innowacyjnych zastosowaniach m.in. betonu porowatego czy też oczyszczającego powietrze.

Prof. Tomasz Siwowski z Politechniki Rzeszowskiej przybliżył uczestnikom konferencji tematykę związaną z budową tuneli w ciągu drogi eks-



Jolanta Kaźmierczak, wiceprezydent Rzeszowa



Bogdan Tarnawski, dyrektor GDDKiA



Marek Surowiec, Cement Ożarów



Prof. Grzegorz Bajorek, PRZ

presowej S19. Będą one drążone tarczą TBM (ta technologia realizacji jest tańsza) która we wrześniu lub październiku br. dotrze na Podkarpacie. Naprawa nawierzchni betonowej dróg, zatok autobusowych czy też autostradowych punktów poboru opłat może odbywać się z wykorzystaniem betonowych elementów prefabrykowanych. O wykorzystaniu tej technologii mówił Przemysław Moszczak z OAT.

Trwała, bezpieczna i ekonomiczna nawierzchnia drogowa powstanie, jeżeli będzie dobrze współpracować z podłożem, będzie miała odpowiednią trwałość zmęczeniową, będzie odporna na szkody mrozowe, będzie miała odpowiednią przyczepność i odwodnienie, a to zależy od prawidłowego zaprojektowania dróg o nawierzchniach sztywnych – betonowych, o czym mówił dr Lesław Bichajło z PRZ, dyrektor SITKOM Rzeszów.

– Nawierzchnie betonowe występują na 1400 km dróg samorządowych. Szacujemy, że rocznie w Polsce powstaje ok. 150 km dróg samorządowych z nawierzchnią betonową – mówił prof. Jan Deja. Apeluję do samorządowców, by nie odrzucać budowy dróg betonowych tylko dlatego, że nie mają doświadczeń.

Rafał Wilk, technolog z rzeszowskiej firmy Styrobud, mówił o wykorzystaniu betonu do budowy dróg na terenie gminy Hyżne. Droga betonowa zbudowana przez Styrobud w miejscowości Szklary ma 160 metrów długości, 3,2 m szerokości, a warstwa nawierzchniowa betonu 16 cm grubości. Co 3,5 m wykonawca nacinał szczeliny dylatacyjne.

Piotr Piestrzyński