

Dr hab. inż. Tomasz Baran

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie

Dr inż. Mikołaj Ostrowski

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie

Dr inż. Magda Kosmal

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie

Skład i kierunki stosowania niskoemisyjnego betonu z cementów wieloskładnikowych

Composition and directions of application of low-emission concrete made of multi-component cements

Streszczenie

Niskoemisyjne cementy wieloskładnikowe produkowane w Polsce, głównie z udziałem popiołu lotnego krzemionkowego i/lub granulowanego żużla wielkopiecowego oraz wapienia, jako zamienników wysokoemisyjnego klinkieru portlandzkiego, zapewniają duży poziom obniżenia emisji CO₂ na jednostkę produktu. Stosowanie tych cementów w przemyśle betonowym umożliwia projektowanie i wytwarzanie niskoemisyjnych betonów o obniżonej emisji CO₂. W artykule przedstawiono dane potwierdzające możliwość uzyskania wysokich wytrzymałości betonu, przy niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego w mieszance betonowej. Przy zawartości 100-120 kg klinkieru portlandzkiego w 1 m³ mieszanki betonowej można uzyskać beton o wytrzymałości na ściskanie blisko 100 MPa, po 28 dniach. Dla betonu towarowego klasę wytrzymałości C40/50 można uzyskać przy udziale 70 - 100 kg klinkieru portlandzkiego w 1 m³ mieszanki betonowej. Wprowadzono wskaźnik emisji CO₂ betonu (We) obliczony jako ilość kg CO₂ w 1 m³ betonu, przypadająca na 1MPa wytrzymałości na ściskanie betonu po 28 dniach twardnienia.

Niskoemisyjne cementy wieloskładnikowe zawierające powyżej 30% składnika nieklinkierowego granulowanego żużla wielkopiecowego lub popiołu lotnego krzemionkowego umożliwiają projektowanie betonów niskoemisyjnych, dla których

wskaźnik emisji CO₂ betonu jest 4-5 krotnie niższy w porównaniu z betonem z cementu portlandzkiego CEM I. Niskoemisyjne betony kształtują korzystne cechy użytkowe i trwałość betonu, osiągając parametry porównywalne lub lepsze w porównaniu do betonu z cementu portlandzkiego CEM I.

Abstract

Low-emission multi-component cements produced in Poland, mainly with siliceous fly ash and/or granulated blast furnace slag and limestone, as substitutes for high-emission Portland clinker, provide a high level of CO₂ emission reduction per unit of product. The use of these cements in the concrete industry makes it possible to design and produce low-emission concretes with reduced CO₂ emissions. The article presents data confirming the possibility of obtaining high concrete strengths with a low Portland clinker content in the concrete mix. At a content of 100-120 kg of Portland clinker in 1 m³ of concrete mix, concrete with a compressive strength close to 100 MPa can be obtained after 28 days. For ready-mix concrete, the strength class C40/50 can be obtained with 70 - 100 kg of Portland clinker in 1 m³ of concrete mix. The CO₂ emission factor of concrete (We), calculated as the amount of kg of CO₂ in 1 m³ of concrete, per 1MPa of concrete compressive strength after 28 days of hardening, has been introduced.

Low-emission multi-component cements containing more than 30% of the non-clinker component of granulated blast furnace slag or siliceous fly ash enable the design of low-emission concretes, for which the CO₂ emission rate of concrete is 4-5 times lower compared to concrete made from Portland cement CEM I. Low-emission concretes provide favourable performance characteristics and durability of concrete, achieving parameters comparable or better compared to Portland cement CEM I concrete.

1. Wprowadzenie

W Polsce do produkcji cementów wieloskładnikowych, oprócz klinkieru portlandzkiego, stosuje się głównie popiół lotny krzemionkowy V i/lub granulowany żużel wielkopiecowy. Te dwa nieklinkierowe składniki główne cementu (popiół i żużel) charakteryzują się dobrymi właściwościami pucolanowych lub hydraulicznymi, co pozwala na maksymalną substytucję klinkieru w cemencie, nawet do 95%. Najważniejszymi efektami ekologicznymi oraz ekonomicznymi produkcji cementów z dużym udziałem składników nieklinkierowych są:

- ☐ obniżenie emisji CO₂ na jednostkę produktu (cementu),
- ☐ stosowanie odpadowych surowców wtórnych, zastępujących klinkier portlandzki, tj. najbardziej energochłonny składnik główny cementu.

Całkowita emisja w procesie produkcji klinkieru portlandzkiego o przeciętnym składzie fazowym, z naturalnych surowców węglanowych i przy opalaniu tylko pyłem węglowym (bez udziału biomasy) kształtuje się na poziomie ok. 900 kg CO₂/Mg klinkieru [1]. Zastąpienie więc 1% klinkieru portlandzkiego dowolnym nieklinkierowym składnikiem głównym w cemencie obniża emisję CO₂ o 9,0 kg na tonę cementu. Obniżenie emisji CO₂ związane z produkcją cementów CEM II – CEM IV, z maksymalnym, normowym udziałem składnika nieklinkierowego, w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM

I bez udziału składnika drugorzędnego, zestawiono w tablicy 1. W tablicy tej przedstawiono także względną emisję CO₂ dla tych cementów w porównaniu do cementu portlandzkiego, dla którego założono 100% emisję CO₂.

Tablica 1. Emisja CO₂ przypadająca na Mg produkowanego cementu, z maksymalnym normowym udziałem głównego składnika nieklinkierowego

Rodzaj cementu wg PN-EN 197-1 i wg PN-EN 197-5	Skład cementu, % masy				Emisja CO ₂ , kg/Mg cementu	Względna emisji CO ₂ %
	Klinkier	Popiół	Żużel	Gips		
CEM I	95,0	-	-	5,0	855	100
CEM II/A-S	77,0	-	18,0	5,0	693	81
CEM II/A-V	77,0	18,0	-	5,0	693	81
CEM II/B-S	62,0	-	33,0	5,0	558	65
CEM II/B-V	62,0	33,0	-	5,0	558	65
CEM II/B-M (S-V)	62,0	16,5	16,5	5,0	558	65
CEM II/C	48,0	47,0	-	5,0	432	51
CEM III/A	34,0	-	61,0	5,0	306	36
CEM III/B	19,0	-	76,0	5,0	171	20
CEM III/C	5,0	-	90,0	5,0	44	5
CEM IV/A	62,0	33,0	-	5,0	558	65
CEM IV/B	43,0	52,0	-	5,0	387	45
CEM V/A (S-V)	39,0	28,0	28,0	5,0	351	41
CEM V/B (S-V)	19,0	38,0	38,0	5,0	171	20
CEM VI	34,0	15,0	46,0	5,0	306	36

Stosowanie niskoemisyjnych cementów z dużą ilością składników nieklinkierowych w przemyśle betonowym umożliwia projektowanie i wytwarzanie niskoemisyjnych betonów o obniżonej emisji CO₂.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań betonów, wykonanych z przemysłowych niskoemisyjnych cementów wieloskładnikowych, o zawartości składnika głównego, nieklinkierowego w cemencie w ilości od 18 do 70%.

2. Emisja CO₂ a produkcja cementów w Polsce

Rodzaje najczęściej produkowanych cementów wieloskładnikowych w Polsce, o składach wykonanych na pobranych próbkach jednostkowych cementów, przedstawiono w tablicy 2 [1]. W tablicy tej podano/obliczono także ilość emisji CO₂ przypadającą na jednostkę produkcji cementu oraz względną emisję CO₂ dla tych cementów, w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I, dla którego założono 100% względną emisję CO₂.

Tablica 2. Udział nieklinkierowych składników głównych w cementach przemysłowych oraz emisja CO₂ związana z produkcją danego cementu [1]

Rodzaj cementu handlowego	Granulowany żużel wielkopiecowy S *	Popiół lotny krzemionkowy V**	Wapień LL ***	Emisja CO ₂ , kg/Mg cementu ****	Względna emisja CO ₂ , %
	% masy				
CEM I 42,5R	-	-	-	855	100
CEM II/A-V 42,5N-NA,	-	18	-	693	81
CEM II/B-V 32,5R-HSR	-	29	-	594	69
CEM IV/B (V) 32,5N-LH/NA	-	41	-	486	57
CEM II/A-S 52,5N	18	-	-	693	81
CEM II/B-S 42,5N-NA	29	-	-	594	69
CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	54	-	-	369	43
CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA	70	-	-	225	26
CEM II/A-LL 42,5R	-	-	17	702	82
CEM II/B-LL 32,5R	-	-	22	657	77
CEM II/B-M (S-V) 42,5N	14	15	-	594	69
CEM II/B-M (V-LL) 32,5R	-	21	10	576	67
CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA	18	23	-	486	57
CEM V/B (S-V) 32,5N-LH/HSR/NA	32	28	-	315	37
Uwagi: * dla jednego składnika badanie wg PN-B-19707, załącznik B; dla dwóch składników badanie wg CEN TR 196-4. ** obliczono z części nierozpuszczalnych NR, oznaczonych wg PN-EN 196-2. *** badanie wg CEN TR 196-4. **** uwzględniono 5% dodatek regulatora wiązania w cementach (tab. 1).					

Mniejsza emisja CO₂ związana z produkcją cementów CEM II-CEM V, w stosunku do cementu portlandzkiego CEM I, potwierdza niskoemisyjność cementów przemysłowych z udziałem składnika głównego nieklinkierowego. Ze wzrostem udziału składnika głównego nieklinkierowego w cemencie, emisja CO₂ przypadająca na jednostkę masy produkowanego cementu ulega zmniejszeniu (tab. 2). W przypadku cementu pucolanowego CEM IV/B (V) 32,5N-LH/NA, zawierającego 41% popiołu lotnego krzemionkowego V obserwujemy obniżenie emisji o 369 kg (43%) CO₂ na Mg tego cementu, w porównaniu z cementem portlandzkim CEM I 42,5R. W przypadku

cementów hutniczych CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA i CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA odnotowujemy jeszcze większe obniżenie emisji, odpowiednio o 486 kg (57%) i 630 kg (74%) CO₂ na Mg cementu, w porównaniu z cementem portlandzkim CEM I 42,5R. Natomiast w przypadku cementów wieloskładnikowych CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA i CEM V/B (S-V) 32,5N-LH/HSR/NA obniżenie emisji CO₂ na Mg tego cementu, w porównaniu z cementem portlandzkim CEM I 42,5R wynosi odpowiednio 369 kg (43%) i 540 kg (63%).

Zastosowanie wymienionych niskoemisyjnych cementów z dużą ilością nieklinkierowych składników głównych w produkcji betonu daje możliwość wytwarzania betonu o niskim wskaźniku emisji CO₂ [1].

Efekt obniżenia emisji CO₂ w przypadku stosowania przemysłowych cementów na jednostkę objętości i masy wytworzonego betonu, w porównaniu z cementem portlandzkim przedstawiono w tabeli 3. W tabeli tej przedstawiono teoretyczne obliczenia emisji CO₂ betonu o zawartości 330, 400 i 450 kg cementu/m³ mieszanki betonowej. Powyższe zawartość cementu w mieszance betonowej założono odpowiednio dla betonu klasy C25/30, C40/50 i C50/60.

Tabela 3. Emisja CO₂ przypadająca na beton wykonany z cementów przemysłowych

Rodzaj cementu przemysłowego*	Zawartość cementu w 1 m ³ mieszanki betonowej, kg					
	330		400		450	
	Emisja CO ₂ , kg					
	m ³ betonu*	Mg betonu**	m ³ betonu*	Mg betonu**	m ³ betonu*	Mg betonu*
CEM I 42,5R	282	123	342	149	385	167
CEM II/A-V 42,5N-NA,	229	100	277	120	312	136
CEM II/B-V 32,5R-HSR	196	85	238	103	267	116
CEM IV/B (V) 32,5N-LH/NA	160	70	194	84	219	95
CEM II/A-S 52,5N	229	100	277	120	312	136
CEM II/B-S 42,5N-NA	196	85	238	103	267	116
CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	122	53	148	64	166	72
CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA	74	32	90	39	101	44
CEM II/A-LL 42,5R	231	100	280	122	316	137
CEM II/B-LL 32,5R	217	94	263	114	296	129
CEM II/B-M (S-V) 42,5N	196	85	238	103	267	116
CEM II/B-M (V-LL) 32,5R	190	83	230	100	259	113
CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA	160	70	194	84	219	95
CEM V/B (S-V) 32,5N-LH/HSR/NA	104	45	126	55	142	62
* składki cementów przemysłowych wg tab. 2,						
** przeciętna gęstość betonu zwykłego 2,3 tony/m ³						

Przy zawartości 29% dodatków w cementach przemysłowych CEM II/B-V 32,5R-HSR i CEM II/B-S 42,5N-NA (tab. 2), w zależności od zawartości cementu w betonie emisja CO₂ wynosi od 196 kg do 267 CO₂/m³ betonu (tab. 3). Przy bardzo dużym udziale składnika nieklinkierowego w cemencie, np. CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA emisja CO₂ w betonie z tego cementu, w zależności od zawartości cementu (klasy betonu) wynosi od 74 do 101 kg CO₂/m³ betonu.

Beton o wysokiej zawartości wieloskładnikowego cementu portlandzkiego można kwalifikować jako niskoemisyjny. W literaturze branżowej oraz podczas ostatnich wydarzeń poświęconych zrównoważonemu rozwojowi w budownictwie, takich jak konferencja "Dni Betonu 2023", pojawiły się dyskusje na temat betonu niskoemisyjnego. Niemniej jednak, nie istnieje powszechnie przyjęta definicja tego pojęcia. Stwierdzenie, iż beton można uznać za niskoemisyjny już przy zastąpieniu cementu portlandzkiego CEM I cementem wieloskładnikowym CEM II, jest, według autorów niniejszego opracowania, niewystarczające.

Cement CEM I może zawierać do 5% składnika drugorzędowego, natomiast cement CEM II/A-V, będący cementem portlandzkim popiołowym, zawiera co najmniej 6% popiołu lotnego krzemionkowego. Zatem różnica procentowa w zawartości składników nieklinkierowych wynosi około 1%, co według autorów nie jest wystarczającym kryterium do określenia betonu jako niskoemisyjnego. W związku z tym konieczne jest opracowanie jednoznacznych kryteriów oceny niskoemisyjności betonu. Autorzy niniejszego artykułu definiują beton niskoemisyjny, jako kompozyt do wykonania którego został zastosowany cement przy substytucji minimum 30% klinkieru portlandzkiego innym składnikiem głównym [1].

3. Skład i badania betonu niskoemisyjnego

Jako dodatek typu II zastosowano popiół lotny krzemionkowy o mieliwości kategorii N lub S. W celu optymalizacji właściwości mieszanki, zastosowano superplastyfikator nowej generacji GleniumSky 430, a beton wykonano przy różnych wskaźnikach wodno-cementowych. W ramach porównania przygotowano beton odniesienia (referencyjny), w którym jako spoiwo użyto cementu portlandzkiego klasy CEM I 42,5 R. Charakterystyka fizyczna cementów CEM III/B 42,4L-LH/HSR/NA oraz CEM I 42,5 R zastosowanych w badaniach została przedstawiona w tabeli 4.

Zaprojektowano mieszanki betonowe o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego; 70 kg, 100 kg, 120 kg w 1 m³ mieszanki betonowej. Do przygotowania mieszanek betonowych zastosowano cement hutniczy CEM III/B 42,4L-LH/SR/NA o zawartości 70% żużla granulowanego. Jako dodatek typu II, do mieszanki betonowej dodano popiołu lotnego krzemionkowego o mieliwości kategorii N lub S. Wykonano betony przy różnych wskaźnikach wodno-cementowych z dodatkiem superplastyfikatora nowej generacji GleniumSky 430. W celu porównawczym wykonano beton odniesienia/referencyjny, w którym jako spoiwo zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R. Właściwości fizyczne cementów CEM III/B 42,4L-LH/HSR/NA i CEM I 42,5 R zastosowanych do betonów przedstawiono w tablicy 4.

Tablica 4. Właściwości fizyczne cementów przemysłowych

Rodzaj cementu	Powierzchnia właściwa cm^2/g	Czas wiązania		Konsystencja normowa %	Wytrzymałość na ściskanie po dniach, MPa			
		początek	koniec		2	7	28	90
CEM I 42,5 R	3600	160	210	28,0	26,6	46,4	58,9	61,3
CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA	5200	240	285	26,5	11,1	24,3	54,1	71,2

Zaprojektowano 3 betony odniesienia, zakładając udział cementu; 450, 360 i 280 kg/m^3 mieszanki betonowej, odpowiednio jak dla betonów wysokiej wytrzymałości, betonu wzorcowego wg norm czynnościowych badania właściwości betonu oraz betonu zawierającego minimalną zawartość cementu, z uwagi na klasy ekspozycji wg normy PN-EN 206-1 [2]. Mieszanki betonowe przygotowano z naturalnych kruszyw bazaltowych, żwirowych i piasku.

Składy betonów zawierające klinkier w ilości 120, 100 i 70 kg w 1 m^3 betonu spełniały wymagania dotyczące zawartości cementu i stosunku wody do cementu (w/c), uwzględniając wymagania określone dla klas ekspozycji zgodnie z normą PN-EN 206-1 [2].

Ustalone składy mieszanek betonowych przedstawiono w tablicy 5.

W celu uzyskania zakładanej wytrzymałości betonu dla wymienionych klas: C25/30, C40/50 i C50/60, przy ograniczonej ilości klinkieru portlandzkiego od 70 do 120 kg na 1 m^3 mieszanki betonowej (tab. 3), wymagana jest modyfikacja składu mieszanki betonowej uwzględniająca:

- ☐ aktywację mechaniczną składników nieklinkierowych cementu, poprzez zapewnienie wysokiego stopnia rozdrobnienia granulowanego żużla wielkopiecowego w cemencie oraz wykorzystanie popiołu lotnego krzemionkowego o dużej mialkości; odmiany N, korzystnie odmiany S,
- ☐ wysoką aktywność cementów poprzez ich aktywację mechaniczną mielenia do dużej powierzchni właściwej,
- ☐ wykorzystanie efektu synergii granulowanego żużla wielkopiecowego z popiołem lotnym krzemionkowym,
- ☐ stosowanie efektywnych domieszek w celu uzyskania odpowiednio niskiego współczynnika wodno-cementowego oraz polepszenia urabialności mieszanki betonowej.

Przedstawione modyfikacje składu mieszanki betonowej, mające na celu ograniczenie emisji dwutlenku węgla (CO_2) w produkcji betonu o niskim śladzie węglowym, zostały zweryfikowane w warunkach laboratoryjnych [3]. Następnie, rozwiązania te zostały wdrożone na skalę przemysłową w procesie produkcji betonów masywnych i wielkogabarytowych, przy użyciu cementu hutniczego typu CEM III/B 42,5L, charakteryzującego się zawartością żużla wynoszącą 70% i dodatku popiołu lotnego typu II o mialkości kategorii N lub S [4–6].

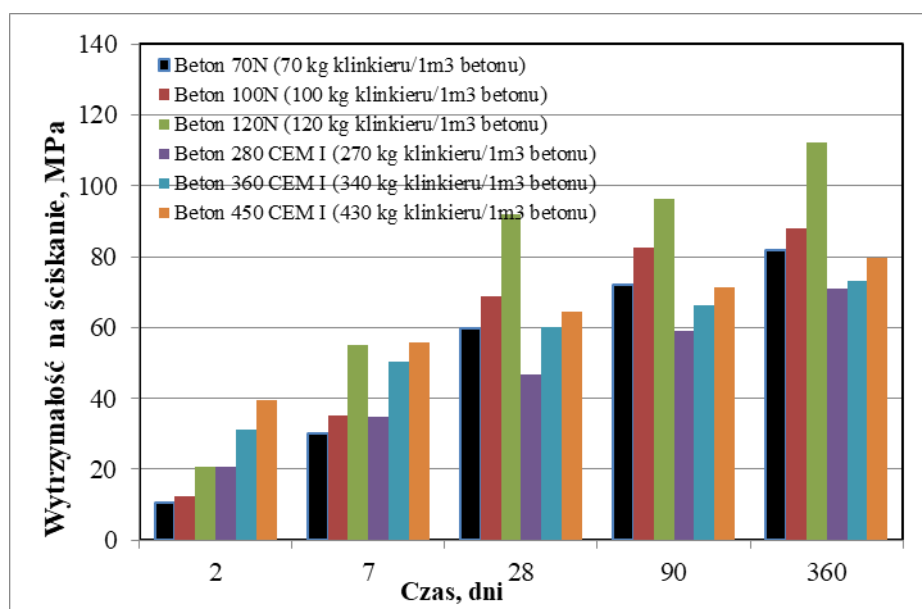
Różne warianty składu mieszanek betonowych zestawiono w tablicy 5 [3]. Wytrzymałości betonów przedstawiono w tablicy 6 oraz na rys. 1.

Tablica 5. Skład mieszanek betonowych [3]

Opis betonu	B120N	B120S	B450 CEM I	B100N	B100S	B360 CEM I	B70N	B280 CEM I
Udział składnika								
Cement hutniczy CEM III/B 42,5L [kg/m ³]	400	400	-	332	332	-	233	-
Popiół lotny krzemionkowy* [kg/m ³]	125 (kat. N)	125 (kat. S)	-	70 (kat. N)	70 (kat. S)	-	118 (kat. N)	-
Cement _{eq} = C + 0,4 p [N3]	450	450	-	360	360	-	280	-
Cement portlandzki CEM I 42,5R [kg/m ³]	-	-	450	-	-	360	-	280
Woda [kg/m ³]	167	167	167	162	162	162	154	154
Piasek 0-2 mm [kg/m ³]	655	655	690	705	705	730	620	650
Bazalt 2-8 mm [kg/m ³]	550	550	580	590	590	610	-	-
Bazalt 8-16 mm [kg/m ³]	635	635	670	680	680	705	-	-
Żwir 2-8 mm [kg/m ³]	-	-	-	-	-	-	375	395
Żwir 8-16 mm [kg/m ³]	-	-	-	-	-	-	415	435
Żwir 16-32 mm [kg/m ³]	-	-	-	-	-	-	470	495
w/s = (w/c+0,4p)	0,37	0,37	0,37	0,45	0,45	0,45	0,55	0,55
Zawartość klinkieru w 1m ³ [kg/m ³]	120	120	430	100	100	340	70	270
B120/100/70/N/S- mieszanki betonowe zawierające odpowiednio 120,100,70 kg/m³ klinkieru z cementu CEM III/B 42,5L, zawierającego 70% żużla oraz popiół lotny V kategorii N lub S B450/360/280/CEM I - betony odniesienia zawierające odpowiednio 450,360,280 kg/m³ cementu portlandzkiego CEM I 42,5R bez dodatku drugorzędowego * N – popiół lotny krzemionkowy kategorii N wg PN-EN 450-1:2012 * S – popiół lotny krzemionkowy kategorii S wg PN-EN 450-1:2012								

Tablica 6. Wytrzymałość na ściskanie betonów [3]

Rodzaj betonu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]					Klasa betonu
	2 dni	7 dni	28 dni	90 dni	360 dni	
B120 N	20,6	55,1	92,0	96,2	112,3	C50/60
B120 S	18,1	55,3	89,0	104,4	118,6	
B450 CEM I	39,5	55,8	64,3	71,2	79,6	
B100 N	12,4	35,3	68,9	82,4	87,9	C40/50 a nawet C50/60
B100 S	12,6	33,7	70,9	82,3	90,0	
B360 CEM I	31,3	50,3	60,3	66,3	73,1	
B70 N	10,4	30,2	59,6	72,1	81,7	C25/30 a nawet C40/50
B280 CEM I	20,8	34,9	46,8	59,0	71,0	



Rys. 1. Dynamika narastania wytrzymałości na ściskanie betonów [3]

Przedstawione dane potwierdzają możliwość uzyskania wysokich wytrzymałości betonu, przy niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego w mieszance betonowej (tab. 6, rys. 1). Przy zawartości 100-120 kg klinkieru portlandzkiego w 1 m³ mieszanki betonowej można uzyskać beton o wytrzymałości na ściskanie blisko 100 MPa, po 28 dniach (rys. 1). Dla betonu towarowego klasę wytrzymałości C40/50 można uzyskać przy udziale 70-100 kg klinkieru portlandzkiego w 1 m³ mieszanki betonowej (rys. 1). Przy stosowaniu niskoemisyjnego cementu hutniczego CEM III/B 42,5L, zawierającego 70% granulowanego żużla wielopieczowego i przy stosowaniu popiołu lotnego krzemionkowego jako dodatku typu II, wskaźnik emisji CO₂ betonu jest 4 - 5 razy mniejszy w porównaniu do wskaźnika emisji betonu z cementu portlandzkiego CEM I (tab. 7).

Tablica 7. Wskaźnik emisji CO₂ betonu

Mieszanka wg tablicy 5	Rodzaj cementu	Ilość cementu [kg/m ³ betonu]	Wskaźnik w/s	Klasa betonu	Ilość klinkieru w cemencie [kg]	Emisja* CO ₂ [kg/m ³ betonu]	Wytrzymałość betonu po 28 dniach 28, (wg tab. 6), [MPa]	Wskaźnik** emisji betonu [kg CO ₂ /1MPa]
B120 N	CEM	400	0,37	C50/60	120	108	92,0	1,17
B100 N	III/B	332	0,45	C40/50	100	90	68,9	1,31
B70 N	42,5L	233	0,55	C25/30	70	63	59,6	1,06
B450 CEM I	CEM I 42,5R	450	0,37	C50/60	430	387	64,3	6,02
B360 CEM I		360	0,45	C40/50	340	306	60,3	5,07
B280 CEM I		280	0,55	C25/30	270	243	46,8	5,19

*do obliczeń przyjęto wartość emisji 900 kg CO₂/Mg klinkieru

**ilość emisji CO₂ przypadająca na 1 MPa wytrzymałości na ściskanie betonu po 28 dniach twardnienia

Wskaźnik emisji CO₂ betonu obliczono jako ilość kg CO₂ w 1 m³ betonu, przypadająca na 1MPa wytrzymałości na ściskanie betonu po 28 dniach twardnienia, zgodnie ze wzorem:

$$W_e = \frac{E \text{ CO}_2}{R28}$$

gdzie:

W_e - wskaźnik emisji betonu; kg CO₂/1 MPa

E CO₂ - emisja CO₂ przypadająca na 1 m³ betonu; kg

R28 - Wytrzymałość na ściskanie betonu po 28 dniach twardnienia; MPa

Wskaźnika emisji betonu zależy głównie od ilości klinkieru portlandzkiego w 1 m³ betonu. Dla betonu z cementu hutniczego CEM III/B 42,5L wskaźnik emisji, w zależności od ilości cementu w betonie wynosi od 1,06 do 1,31, natomiast dla betonu z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R wskaźnik emisji wynosi od 5,07 do 6,02 (tab. 7).

Podane wskaźniki emisji CO₂ betonu wyznaczają trendy technologii produkcji betonu niskoemisyjnego, poprzez stosowanie cementów wieloskładnikowych z dużą ilością składników głównych nieklinkierowych. Niskoemisyjne cementy z dużą ilością granulowanego żużla wielkopieczowego i/lub popiołu lotnego krzemionkowego stosowane są w produkcji betonów o specjalnych właściwościach użytkowych, w tym do wykonawstwa konstrukcji wielkogabarytowych i masywnych. Wśród najważniejszych właściwości tych cementów, kształtujących korzystne cechy użytkowe i trwałość betonu należy wymienić:

- ☐ dobrą urabialność mieszanki betonowej,
- ☐ niski skurcz,
- ☐ niskie lub bardzo niskie ciepło uwodnienia cementu zapewniające bardzo niską egzotermię twardnienia betonu,
- ☐ dużą odporność na korozję chemiczną: siarczanową i wody morskiej,
- ☐ dużą odporność na korozję alkaliczną oraz możliwość zapobiegania reakcji alkalicznej ASR w betonie w przypadku stosowania kruszyw umiarkowanie reaktywnych R1 [1].

Możliwości stosowania betonów na bazie niskoemisyjnych cementów z dużą ilością dodatków mineralnych i małą ilością klinkieru portlandzkiego, ze względu na klasy ekspozycji betonu wg PN-EN 206 [2], przedstawiono w tablicy 8 [3].

Tablica 8. Zastosowanie betonów o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego [3]

Zawartość klinkieru [kg/m ³]	w/s	Dodatek popiołu	Zastosowanie
120	0,37	Odmiany S	☐ beton konstrukcyjny BWW klasy C50/60 i wyższej, ☐ monolityczne elementy wielkogabarytowe betonowane w sposób ciągły, ☐ betonowe konstrukcje masywne, np. obiekty hydrotechniczne, hydroenergetyczne, podziemne, ☐ elementy betonowe narażone na korozyjne oddziaływanie środowiska (agresję siarczanową, agresję chlorkową), np. beton na fundamenty, systemy odprowadzania i oczyszczania ścieków, infrastruktura dla rolnictwa, budownictwo morskie ☐ produkcja betonów z kruszywem reaktywnym,
100	0,45	Odmiany N lub S	☐ produkcja betonu towarowego w klasie wytrzymałości do C40/50, ☐ monolityczne elementy wielkogabarytowe betonowane w sposób ciągły, ☐ betonowe konstrukcje masywne, np. obiekty hydrotechniczne, hydroenergetyczne, podziemne, ☐ elementy betonowe narażone na korozyjne oddziaływanie środowiska (agresję siarczanową, agresję chlorkową), np. beton na fundamenty, systemy odprowadzania i oczyszczania ścieków, infrastruktura dla rolnictwa, ☐ produkcja betonów z kruszywem reaktywnym, ☐ beton podkładowy, wyrównawczy, wypełniający, ☐ stabilizacja podłoża i podbudowa dróg,
70	0,55	Odmiany N lub S	☐ produkcja betonu zwykłego i specjalnego w klasie wytrzymałości do C25/30, ☐ beton towarowy wymagający transportowania na większe odległości, ☐ monolityczne elementy betonowane w sposób ciągły, ☐ betonowe konstrukcje masywne; obiekty hydrotechniczne, hydroenergetyczne, podziemne, o bardzo małym efekcie samoociepnięcia ☐ elementy betonowe narażone na korozyjne oddziaływanie środowiska (agresję siarczanową, agresję chlorkową), produkcja betonów z kruszywem reaktywnym, ☐ beton chudy, podkładowy, wyrównawczy, wypełniający, ☐ stabilizacja podłoża, ☐ podbudowa dróg.

Coraz częściej przy ustalaniu wskaźnika emisji CO₂ analizowany jest problem związany z pochłanianiem CO₂ przez produkty hydratacji cementu w zaprawie cementowej i betonie, które reagują z CO₂ z atmosfery, tworząc węglan wapnia i inne związki węglanowe [7,8]. Proces ten, zwany karbonatyzacją prowadzi do resorpcji CO₂ w zaprawie i betonie, obniżając całkowity wskaźnik emisji CO₂ betonu [7,8]. Szacowane ilości wiążanego CO₂ w całym cyklu eksploatacji obiektu (życia obiektu) z betonu i zaprawy cementowej mogą wynosić do 20% [7,8]. Tak wysoki poziom wiązania CO₂ w wyrobach cementopochodnych jest znaczący w bilansie emisji CO₂ w przemyśle cementowym. Pomimo coraz większego nacisku na Międzyrządowy Zespół do spraw Zmian Klimatu (ang. Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), karbonatyzacja nie jest uwzględniana w bilansie emisji CO₂ w przemyśle cementowym [7,8].

4. Wnioski z badań

Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki pozwoliły autorom na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Stosując cement hutniczy CEMIII/B o powierzchni właściwej ok. 5000 cm²/g, popiół lotny kategorii N lub S zawierający w swoim do 5% straty prażenia (kategoria A) i superplastyfikatory najnowszej generacji, możemy uzyskać w pełni przydatny w budownictwie beton konstrukcyjny w klasie wytrzymałościowej od C50/60 (zawartość klinkieru 120 kg w m³ mieszanki betonowej), poprzez klasę C40/50 (zawartość klinkieru 100 kg/m³) do klasy C 25/30 (zawartość klinkieru 70 kg/m³).
2. W betonach o niskim stosunku w/c (poniżej 0,4) szczególnie przydatny jest popiół lotny kategorii S. Stosowanie tego rodzaju popiołu pozwala znacząco polepszyć właściwości reologiczne (redukcja wodożądności spoiwa w betonie) i wytrzymałość po dłuższych terminach dojrzewania (powyżej 28 dni dojrzewania).
3. Zastosowanie do mieszanki betonowej cementów wieloskładnikowych o niskiej zawartości klinkieru cementowego pozwala na zmniejszenie blisko pięciokrotnie wskaźnika emisji (We) betonu w porównaniu z betonem wykonanym z cementu portlandzkiego CEM I.

5. Literatura

- [1] T. Baran: Cementy niskoemisyjne w składzie kompozytów cementowych. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2022.
- [2] PN-EN 206+A2:2021-08: Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [3] M. Ostrowski: Rola popiołu lotnego i granulowanego żużla wielkopiecowego w kształtowaniu właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska 2017 rok.
- [4] M. Batog, A. Gołda, Z. Giergiczny: Popiół lotny składnikiem betonu masywnego na fundamenty nowych bloków energetycznych. XXIII Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki, s. 127-144, Zakopane 2016.

- [5] Z. Giergiczny, J. Małolepszy, J. Szwabowski, J. Śliwiński: Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji. Wydawnictwo Górażdże Cement HeidelbergCementGroup, Opole 2002.
- [6] A. Gołda: Beton w konstrukcjach masywnych na przykładzie budowy bloków nr 5 i 6 w Elektrowni Opole. XVI Konferencja Naukowo-techniczna, Reologia w technologii betonu, s. 155, Bełchatów 2018.
- [7] M.A. Sanjuan, C. Andrade, P. Mora, A. Zaragoza: Carbon dioxide uptake by cement-based materials: A Spanish case study. Applied Sciences, 2020, 10, 339, www.mdpi.com/jurnal/applsi.
- [8] M.A. Sanjuan, C. Andrade, P. Mora, A. Zaragoza: Carbon dioxide uptake by mortars and concrete made with Portuguese cements. Applied Sciences, 2020, 10, 646, www.mdpi.com/jurnal/applsi.