

mgr inż. Karol Wandoch^{1*)}

ORCID: 0000-0001-9428-5980

mgr inż. Michał Tałaj¹⁾

ORCID: 0000-0002-2101-0983

Nowe cementy wieloskładnikowe CEM II/C-M i CEM VI w betonach wysokowytrzymałościowych i mrozoodpornych

New cement CEM II/C-M and CEM VI in frost-resistant and high-strength concrete

DOI: 10.15199/33.2021.10.04

Streszczenie. W artykule przedstawiono właściwości nowych rodzajów cementów trójskładnikowych CEM II/C-M (S-V), CEM II/C-M (S-LL) oraz CEM VI (S-V), a także wyniki badań mieszanek betonowych i stwardniałych betonów, świadczące o możliwości zastosowania badanych cementów przy produkcji betonów wysokowytrzymałościowych oraz mrozoodpornych. Norma EN 197-5 klasyfikuje badane cementy jako cementy powszechnego użytku. Charakteryzują się one zmniejszoną zawartością klinkieru portlandzkiego oraz zwiększonym udziałem granulowanego żużla wielkopieczowego (S), popiołu lotnego krzemionkowego (V) oraz wapienia (LL).

Słowa kluczowe: cementy wieloskładnikowe; beton wysokowytrzymałościowy; beton mrozoodporny.

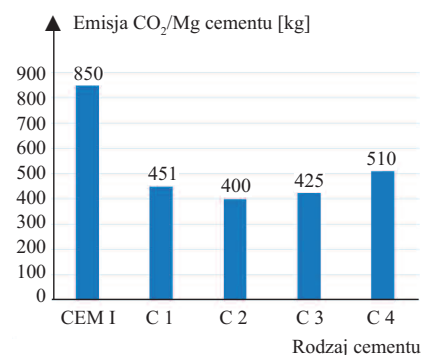
Abstract. The article presents the properties of new Portland-composite cement CEM II/C-M (S-V), CEM II/C-M (S-LL) and composite cement CEM VI (S-V). The test results on concrete mixtures and hardened concretes are present as well, proving the possibility of using tested cements in the production of high-strength and frost-resistant concretes. The EN 197-5 standard classifies the tested binders as common cements. They are characterized by a reduced content of Portland clinker and an increased proportion of the granulated blast furnace slag (S), siliceous fly ash (V) and limestone (LL).

Keywords: ternary cements; high-strength concrete, frost-resistant concrete.

Produkcja cementu jest związana z emisją CO₂ oraz stosowaniem nieodnawialnych surowców naturalnych [4]. Emisja CO₂ pochodzi ze spalania paliwa oraz termicznego rozkładu węgla wapnia, czyli jest to tzw. emisja procesowa [1]. Ograniczanie emisji związanej ze spalaniem paliwa jest realizowane przez zmniejszenie jednostkowego zużycia ciepła, a także stosowanie paliw zastępczych (alternatywnych), w tym biopaliw [2]. Natomiast ograniczenie emisji procesowej jest obecnie ograniczone [13], dlatego też efektywnym sposobem zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych, powstającej przy produkcji cementu, jest ograniczenie zawartości klinkieru portlandzkiego w jego składzie i produkcja cementów wieloskładnikowych CEM II – CEM VI, w których część klinkieru portlandzkiego zastąpiono dodatkami mineralnymi. Dotychczasowe rodzaje cementów powszechnego użytku zawarte w normie PN-EN 197-1:2012 [11] zostały rozsze-

zone w normie EN 197-5:2021-07 [3]. W tabeli 1 przedstawiono skład badanych cementów powszechnego użytku zgodnych z tymi normami.

Rysunek 1 przedstawia przybliżoną ilość dwutlenku węgla emitowanego do atmosfery w procesie produkcji 1 Mg cementu. Do obliczeń przyjęto uśrednioną emisję CO₂ przypadającą na wyprodukowanie 1 Mg klinkieru portlandzkiego na poziomie 850 kg/Mg [1]. Produkcja cementów C1 – C4 pozwala na zmniejszenie ilości powstającego CO₂ o 340 – 450 kg/Mg spoiwa w porównaniu z cementem portlandzkim CEM I, tj. o 40 – 50%.



Rys. 1. Przybliżona emisja CO₂/Mg wyprodukowanego cementu

Fig. 1. Approximate emission CO₂/Mg of cement produced

Tabela 1. Skład badanych cementów wg PN-EN 197-1:2012 [11] oraz EN 197-5:2021-07 [3]
Table 1. Compositions of tested cements according to PN-EN 197-1:2012 [11] and EN 197-5:2021-07 [3]

Oznaczenie cementu w badaniach	Rodzaj cementu	Składniki główne [%]				Składniki drugorzędne [%]
		klinkier K	popiół lotny krzemionkowy V	żużel wielkopieczowy S	wapień LL	
C1	CEM II/C-M(S-V)	50 – 64	36 – 50	–	–	0 – 5
C2	CEM VI (S-V)	35 – 49	6 – 20	31 – 59	–	–
C3	CEM III/A 42,5N	35 – 64	–	36 – 65	–	0 – 5
C4	CEM II/C-M(S-LL)	50 – 64	–	36 – 50	–	0 – 5

¹⁾ Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.

^{*)} Adres do korespondencji: karol.wandoch@betotech.pl

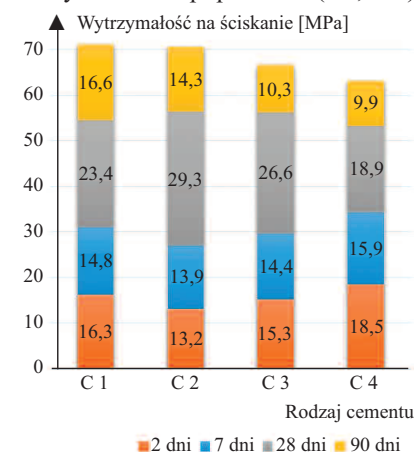
Właściwości cementów wieloskładnikowych

Zastosowane w badaniach cementy zostały wyprodukowane w skali przemysłowej (tabela 1). Wyniki badań ich podstawowych właściwości fizycznych przedstawiono w tabeli 2.

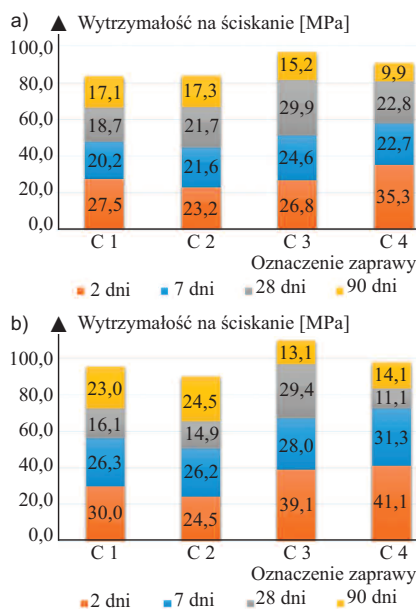
Tabela 2. Właściwości fizyczne cementów
Table 2. Physical properties of cements

Właściwość/cement	C1	C2	C3	C4
Gęstość [g/cm ³]	2,88	2,90	3,02	3,06
Strata prażenia [%]	1,33	1,05	1,39	4,75
Początek czasu wiązania [min]	215	225	240	200

Wytrzymałość na ściskanie zapraw normowych (rysunek 2), zbadana zgodnie z PN-EN 196-1 [10], pozwala zakwalifikować badane cementy do klasy 42,5 N. Największą wytrzymałością na ściskanie po 90 dniach dojrzewania, wynoszącą przeszło 70 MPa, charakteryzowały się cementy wieloskładnikowe żużlowo-popiołowe CEM II/C-M (S-V) i CEM VI (S-V) oznaczone jako C1 i C2. Istotnym czynnikiem wpływającym na dynamikę przyrostu wytrzymałości na ściskanie jest stosunek wodno-cementowy. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie zapraw przy obniżonym stosunku wodno-cementowym. Obniżenie w/c z 0,5 do 0,4 oraz 0,3 spowodowało znaczny przyrost wytrzymałości na ściskanie. Efekt ten jest najbardziej widoczny w przypadku wytrzymałości wczesnej, tj. po 2 i 7 dniach dojrzewania. Przy obniżonym stosunku w/c cementy żużlowo-popiołowe (C1, C2)



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie normowych zapraw cementowych (w/c = 0,5)
Fig. 2. Compressive strength of standard mortars (w/c = 0,5)



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych: a) w/c = 0,4; b) w/c = 0,3
Fig. 3. Compressive strength of mortars: a) w/c = 0,4; b) w/c = 0,3

charakteryzują się znacznym zwiększeniem wytrzymałości na ściskanie w okresie pomiędzy 28 a 90 dniem dojrzewania.

Właściwości mieszanek betonowych oraz betonu

W celu sprawdzenia możliwości zastosowania cementów wieloskładnikowych zaprojektowano betony o różnym przeznaczeniu:

- beton wysokowytrzymałościowy (HPC);
- beton mrozoodporny wg wymagań dotyczących klas ekspozycji XF3 i XF4 wg PN-EN 206 [12].

W tabeli 3 przedstawiono skład oraz przyjęte oznaczenia zaprojektowanych betonów. Betony wykonano z użyciem cementów od C1 do C4, zgodnych z tabelą 1.

Beton wysokowytrzymałościowy HPC

Badanie konsystencji mieszanki betonowej metodą opadu stożka, zgodnie z PN-EN 12350-2 [6], wykonano po 5, 30, 60 oraz 90 min od momentu pierwszego kontaktu wody z cementem. Założony stopień konsystencji mieszanek betonowych to S3 po 90 min. Dodatkowo, po 90 min, wykonano badanie gęstości mieszanki betonowej zgodnie z PN-EN 12350-6 [7] oraz zawartości powietrza metodą ciśnieniową wg PN-EN 12350-7 [8]. Wyniki przedsta-

Tabela 3. Skład mieszanek betonowych
Table 3. Composition of concrete mixtures

Składnik	Oznaczenie betonu		
	HPC	XF3	XF4
Kruszywo drobne	630	698	665
Kruszywo grube żwirowe (D _{max} = 16 mm)	–	1077	–
Kruszywo grube łamane (D _{max} = 16 mm)	1220	–	1323
Cement (C1-C4)	480	330	350
Woda	166	155	155
Pył krzemionkowy	30	–	–
Plastyfikator	1,44	–	–
Superplastyfikator	3,5 ¹⁾	1,72	1,82 ²⁾
Domieszka napowietrzająca	–	0,5	0,53
Stosunek w/c	0,36	0,5	0,4
Minimalna klasa wytrzymałości na ściskanie	powyżej C50/60	C30/37	C30/37

¹⁾ w przypadku betonu HPC4 wykonanego z użyciem cementu CEM II/C-M(S-LL), oznaczonego jako C4, zastosowano superplastyfikator w ilości 3,80 kg/m³; ²⁾ w przypadku betonu XF4-4 wykonanego z użyciem cementu CEM II/C-M(S-LL), oznaczonego jako C4, zastosowano superplastyfikator w ilości 2,03 kg/m³

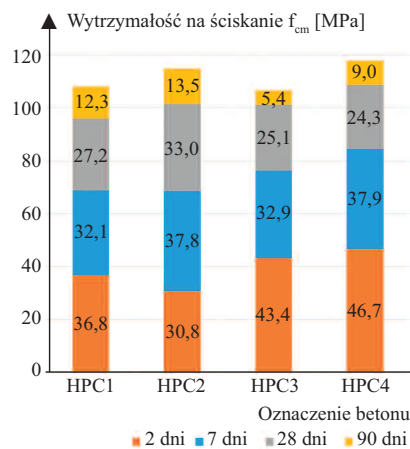
wiono w tabeli 4. Uzyskane wyniki konsystencji mieszanki betonowej świadczą o spełnieniu założonych wymagań dotyczących badanych receptur. Beton HPC4 wymagał zwiększenia dozowania superplastyfikatora o 0,3 kg/m³. Zawartość powietrza w mieszankach betonowych była zbliżona i wahała się od 2,2 do 2,8% objętości.

Tabela 4. Właściwości mieszanek betonowych HPC
Table 4. The results of HPC concrete mix tests

Betón	Opad stożka [mm]				Gęstość [kg/m ³]	Zawartość powietrza [% obj.]
	5 min	30 min	60 min	90 min		
HPC1	160	150	120	100	2460	2,8
HPC2	150	140	130	110	2475	2,5
HPC3	160	160	140	130	2498	2,4
HPC4	160	140	130	100	2523	2,2

Wytrzymałość na ściskanie betonu oznaczono na próbkach sześciennych 100 x 100 x 100 mm zgodnie z normą PN-EN 12390-3 [9]. Próbkę zagęszczano mechanicznie na stoliku wibracyjnym. Po ok. 24 h zostały rozformowane i umieszczone w wodzie o temperaturze 20 ± 2°C. Badanie przeprowadzono po 2, 7, 28 oraz 90 dniach dojrzewania. Wyniki przedstawiono na rysunku 4.

Beton HPC4 charakteryzował się najwyższą dynamiką przyrostu wytrzyma-



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} – betony wysokowytrzymałościowe
Fig. 4. Compressive strength f_{cm} – high-strength concretes

łości na ściskanie we wczesnym okresie dojrzewania, która po 7 dniach dojrzewania przekroczyła 80 MPa (klasa wytrzymałościowa C60/75). Wszystkie badane betony spełniły wymagania klasy wytrzymałości na ściskanie C50/60 już po 7 dniach dojrzewania, natomiast wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach wahała się od 96 MPa (beton HPC1) do ok. 110 MPa (beton HPC4) – uzyskana klasa wytrzymałości na ściskanie to C70/85. Betony HPC1 oraz HPC2 wykonane z zastosowaniem cementów wieloskładnikowych, zawierających w składzie granulowany żużel wielkopiecowy i popiół lotny krzemionkowy, charakteryzowały się największym przyrostem wytrzymałości w okresie pomiędzy 28 a 90 dniem dojrzewania, co jest spowodowane efektem synergii właściwości aktywnych składników.

Betony mrozoodporne XF3 i XF4

Zaprojektowano betony o składzie spełniającym wymagania klas ekspozycji XF3 i XF4. Klasa XF3 zakłada, że beton narażony jest na ekspozycję w środowisku silnie nasyconym wodą bez obecności środków odladzających, takich jak np. poziome powierzchnie betonowe narażone na deszcz i mróz. Klasa ekspozycji XF4 zakłada korozyjne oddziaływanie spowodowane cyklicznym zamrażaniem/rozmarzaniem w obecności soli odladzających lub wody morskiej (nawierzchnie dróg, mostów, placów itp.).

Betony spełniające wymagania klasy ekspozycji XF3 wykonano z użyciem

cementów C1, C2 oraz C3, natomiast spełniające wymagania klasy ekspozycji XF4 z cementami od C1 do C4. Założono zawartość powietrza w mieszance betonowej na poziomie 5,0% obj. (-0,5%, +1,0%) oraz klasę konsystencji S3. Skład mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 3, właściwości w tabeli 5, a wyniki wytrzymałości na ściskanie na rysunku 5.

Tabela 5. Właściwości mieszanek betonowych klas ekspozycji XF3 oraz XF4

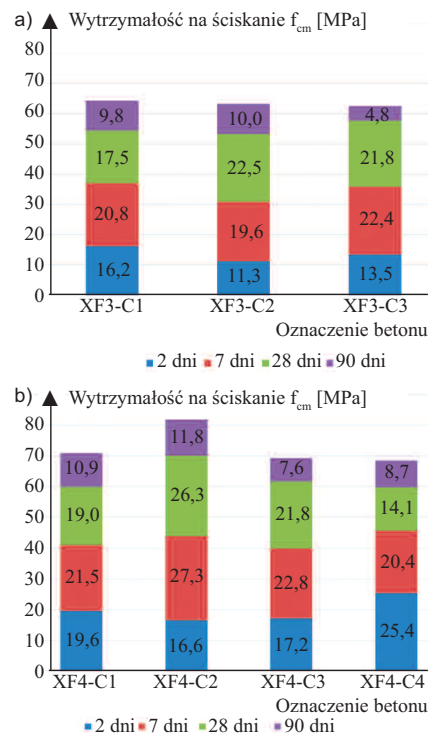
Table 5. Properties of fresh-concrete for exposure classes XF3 and XF4

Beton	Temperatura [°C]	Gęstość [kg/m ³]	Zawartość powietrza [% obj.]
XF3-C1	21	2254	4,8
XF3-C3	20	2282	6,0
XF3-C2	20	2297	5,5
XF4-C1	20	2446	5,9
XF4-C2	21	2495	4,6
XF4-C3	20	2471	5,1
XF4-C4	20	2490	5,0

Mieszanki betonowe XF3 oraz XF4 spełniały założoną konsystencję S3 przez 90 min (badana wg normy PN-EN 12350-2 [6]). Dozowanie superplastyfikatora przyjęto na poziomie 0,52% m.c. w przypadku betonów XF3 oraz 0,52 – 0,58% m.c. – betonów XF4. Największego dozowania superplastyfikatora wymagał beton z zastosowaniem cementu z dodatkiem kamienia wapiennego (LL) CEM II/C-M (S-LL) oznaczony jako C4. W przypadku pozostałych cementów nie zaobserwowano istotnych różnic w reologii mieszanek przy stałym dozowaniu domieszki upłynniającej. Dozowanie domieszki napowietrzającej przyjęto na poziomie 0,15% m.c. Zawartość powietrza, mierzona metodą ciśnieniową wg normy PN-EN 12350-7 [8], mieściła się w założonym przedziale 4,5 – 6% objętościowo.

Betony klasy ekspozycji XF3 osiągnęły wytrzymałość na ściskanie f_{cm} większą niż 50 MPa po 28 dniach dojrzewania, co odpowiada klasie wytrzymałości na ściskanie C35/45 wg PN-EN 206 [12]. Natomiast po 90 dniach dojrzewania wytrzymałość była większa od 60 MPa w przypadku wszystkich betonów, co pozwala zakwalifikować je do klasy wytrzymałości na ściskanie C45/55.

Betony mrozoodporne klasy ekspozycji XF4 osiągnęły po 28 dniach dojrzewania wytrzymałość f_{cm} powyżej 60 MPa,



Rys 5. Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} – betony mrozoodporne: a) w przypadku klasy ekspozycji XF3; b) w przypadku klasy ekspozycji XF4
Fig. 5. Compressive strength f_{cm} – frost-resistant concretes: a) exposure class XF3; b) exposure class XF4

która po 90 dniach dojrzewania zwiększyła się do ok. 70 MPa, co odpowiada klasie wytrzymałości na ściskanie C50/60. Wytrzymałość f_{cm} betonu wykonanego na cementie C2 wyniosła ok. 80 MPa (klasa wytrzymałości na ściskanie C60/75). W przypadku projektowanych betonów XF3 i XF4 założonym poziomem mrozoodporności był stopień F150 wg PN-B-06265 [5]. Wyniki badania mrozoodporności zwykłej wraz z kryteriami oceny przedstawiono w tabeli 6. Już po 28 dniach dojrzewania wszystkie betony XF3 oraz XF4 spełniły stopień mrozoodporności F150 z dużym zapasem w porównaniu z wymaganiami. Dojrzewanie w czasie równoważnym [5], wynoszącym 90 dni, wpłynęło na poprawę wyników.

Betony XF4 zbadano również pod kątem odporności na cykliczne zamrażanie-rozmarzanie w obecności soli odladzających, zgodnie z PN-B-06265 [5], po 90 dniach dojrzewania. Badanie polegało na poddaniu powierzchni, uzyskanej z przecięcia badanej próbki betonowej, cykлом zamrażania/rozmarzania pod warstwą 3% roztworu chlorku sodu

Tabela 6. Wyniki badania mrozoodporności zwykłej – F150

Table 6. Results of the frost resistance test – F150 degree

Beton	Okres dojrzewania [dni]	Średni spadek masy Δm_F	Mrozoodporność zwykła F150			wymagania zgodnie z PN-B-06265 [6] [%]
			średnia wytrzymałość próbek porównawczych f_{r1} [MPa]	średnia wytrzymałość próbek mrożonych f_{r2} [MPa]	średni spadek wytrzymałości Δf_F [%]	
XF3-C1	28	0,31	65,2	62,5	4,2	próbki nie wykazują pęknięć $\Delta m_F \leq 5$ $\Delta f_F \leq 20$
	90	0,16	68,1	67,6	0,8	
XF3-C2	28	0,43	62,2	57,8	7,1	
	90	0,28	66,7	64,1	3,9	
XF3-C3	28	0,25	61,9	58,6	5,4	
	90	0,13	64,6	62,3	3,6	
XF4-C1	28	0,25	70,5	68,8	2,4	
	90	0,04	75,2	74,2	1,3	
XF4-C2	28	0,41	77,0	73,7	4,3	
	90	0,03	81,2	80,1	1,3	
XF4-C3	28	0,39	68,4	65,5	4,2	
	90	0,11	71,7	70,6	1,5	
XF4-C4	28	0,04	67,2	65,9	1,9	
	90	0,12	70,9	70,1	1,1	

(NaCl) grubości 3 mm. Wynikiem badania jest masa zżuszczonego materiału z badanej powierzchni po 56 cyklach zamrażania/rozmarzania. Kryteria oceny mrozoodporności w obecności soli odladzających przedstawia tabela 7, a wyniki badania rysunek 6.

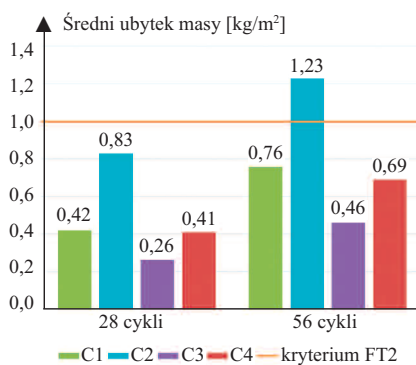
Zbadane betony klasy ekspozycji XF4 spełniły kryterium mrozoodporności w obecności soli odladzających FT2, z wyjątkiem betonu z zastosowaniem cementu CEM VI (S-V), oznaczonego jako C2 (ubytek masy 1,23 kg/m² po 56 cyklach), charakteryzującego się największą ilością nieklinkierowych składników głównych w składzie. Podkreślić należy, że projektowany skład betonów

Tabela 7. Kryteria odporności próbek betonu na cykle zamrażania-rozmarzania w obecności soli odladzających wg PN-B-06265 [5]

Table 7. Criteria for freeze-thaw resistant concrete in the presence of de-icing salts according to PN-B-06265 [5]

Kategoria	Ubytek masy po 28 cyklach m_{28}	Ubytek masy po 56 cyklach m_{56}	Stopień ubytku m_{56}/m_{28}
FT0	brak wymagań	brak wymagań	brak wymagań
FT1	wartość średnia ≤ 1 kg/m ² , przy czym żaden pojedynczy wynik nie powinien być większy niż 1,5 kg/m ²	brak wymagań	brak wymagań
FT2	średnio $\leq 0,5$ kg/m ²	wartość średnia ≤ 1 kg/m ² , przy czym żaden pojedynczy wynik nie powinien być większy niż 1,5 kg/m ²	$\leq 2,0$

XF4 znajdował się przy dolnych kryteriach wymaganych w przypadku tej klasy ekspozycji. Można zatem sądzić, że modyfikacja składu mieszanki betonowej (zwiększenie ilości cementu, niższe w/c) pozwoli spełnić kryterium FT2 także w przypadku betonu z zastosowaniem cementu CEM VI (S-V).



Rys. 6. Wyniki badania mrozoodporności w obecności soli odladzających wg PN-B-06265 (90 dni dojrzewania) a kryterium FT 2
Fig. 6. Results of the frost resistance test in the presence of de-icing salts acc. PN-B-06265 (90 days of curing) and criterion FT2

Podsumowanie

Zastosowanie cementów niskoklinkierowych (CEM II/C i CEM VI) zawierających w składzie popiół lotny krzemionkowy (V), zmielony granulowany żużel wielkopiecowy (S) oraz kamień wapienny (LL), a także cement hutniczy CEM III/A, oprócz efektów ekologicz-

nych w postaci zmniejszonej emisji CO₂ i zagospodarowania ubocznych produktów przemysłowych, pozwala uzyskać betony wysokowytrzymałościowe, a także betony o dużej odporności na działanie mrozu, jednego z głównych i najgroźniejszych czynników korozyjnych występujących w polskiej strefie klimatycznej. W przypadku zastosowania cementów niskoemisyjnych, wraz z aktualnie dostępnymi domieszkami chemicznymi (superplastyfikatory, domieszki napowietrzające) możliwe jest utrzymanie założonej konsystencji oraz urabialności mieszanki betonowej w czasie niezbędnym do prawidłowej realizacji procesu budowlanego, przy zachowaniu niskiego stosunku w/c.

Literatura

[1] Baran Tomasz. 2019. „Ograniczenie emisji gazów i pyłów związane z wykorzystaniem odpadów w przemyśle cementowym”. *Materiały Budowlane* 12: 4 – 7.

[2] Chłodziński Sławomir, Albin Garbacik. 2008. *Cementy wieloskładnikowe w budownictwie*.

[3] EN 197-5 Cement – Part 5: Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI

[4] Neville Adam M. 2012. *Właściwości betonu*. Kraków. Stowarzyszenie Producentów Cementu.

[5] PN-B-06265:2018-10 Beton Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie normy PN-EN 206+A1:2016-12.

[6] PN-EN 12350-2:2019-07. Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.

[7] PN-EN 12350-6:2019-08 Badania mieszanki betonowej – Część 6: Gęstość.

[8] PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.

[9] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

[10] PN-EN 196-1:2016-07 Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.

[11] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.

[12] PN-EN 206+A1:2021-08 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

[13] Stowarzyszenie Producentów Cementu. 2019. „O betonie i przemyśle cementowym na szczycie klimatycznym COP24”, pp. 74–76.

Przyjęto do druku: 27.09.2021 r.