

MAREK GAWLICKI¹⁾

PRZYDATNOŚĆ CEMENTÓW WIELOSKŁADNIKOWYCH I DODATKÓW MINERALNYCH DO PRODUKCJI BETONU NA POKRYWY STUDZIENEK KANALIZACJI KABLOWEJ

STRESZCZENIE. W pracy podjęto próbę usystematyzowania informacji o składnikach głównych cementów wieloskładnikowych produkowanych w Polsce i dodatkach typu II do betonów. Dokonano również porównania konwencjonalnych popiołów lotnych i popiołów lotnych z kotłów fluidalnych (CAFBC) oraz omówiono możliwości wykorzystania cementów mieszanych do produkcji betonów, które mogą być użyte do wytwarzania prefabrykowanych pokryw i zwieńczeń studzienek kanalizacji kablowej.

1. WPROWADZENIE

Zmieniające się uwarunkowania produkcji cementów powszechnego użytku wynikające z narastających ograniczeń emisji do atmosfery antropogenicznego dwutlenku węgla, dążenie do racjonalnego zagospodarowania jak największych ilości odpadów przemysłowych, a także chęć obniżenia kosztów wytwarzania cementów, skłaniają

¹⁾ dr hab. inż. – Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki AGH w Krakowie

producentów do zmniejszania zawartości klinkieru portlandzkiego w cementach powszechnego użytku i ograniczania produkcji CEM I na rzecz cementów wieloskładnikowych [1 - 2]. Cementy te, nazywane także cementami mieszanymi [3], zawierają obok klinkieru portlandzkiego również jeden lub kilka innych składników głównych, którymi zgodnie z PN-EN 197-1:2002 mogą być: granulowany żużel wielkopiecowy, popioły lotne, pył krzemionkowy, naturalne pucolany, łupek palony oraz wapień. Składniki te są aktywne w układzie cement-woda i w znaczący sposób wpływają na szereg właściwości użytkowych zapraw i betonów. Część z wymienionych materiałów – krzemionkowy popiół lotny, zmielony granulowany żużel wielkopiecowy, pył krzemionkowy – może być wykorzystana również jako dodatki typu II do betonu wg PN-EN 206-1:2003.

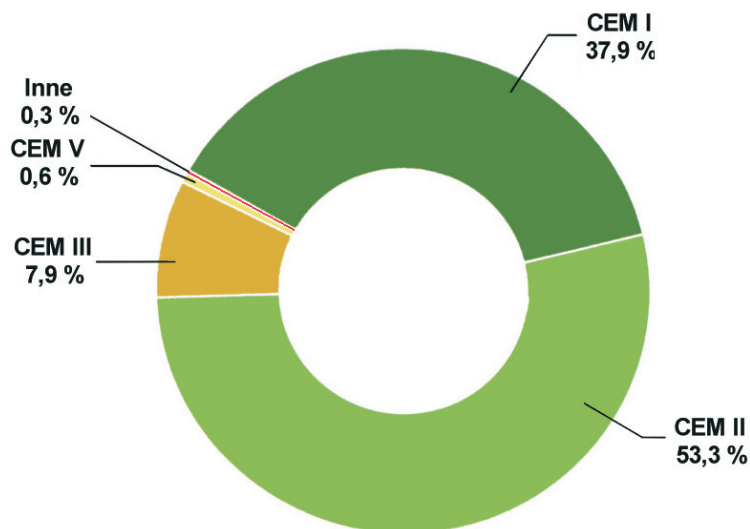
Udział cementu portlandzkiego CEM I w całkowitej masie cementów powszechnego użytku wytwarzanych w Polsce jest nadal znaczny [4]. Należy jednak sądzić, że tendencja zastępowania cementu CEM I cementami wieloskładnikowymi CEM II – CEM V będzie się nasilać i producenci betonów wykorzystywać będą coraz większe ilości tego rodzaju cementów.

W prezentowanej pracy autor usiłował stworzyć „kompatybilny obraz” cementów wieloskładnikowych, dodatków typu II do betonów i ubocznych produktów spalania węgla, wychodząc z założenia, że dla czytelnika pragnącego wykorzystać te informacje do podjęcia określonych decyzji przy projektowaniu różnego rodzaju betonów, w tym również betonów do wytwarzania wyrobów prefabrykowanych, takie ujęcie problemu będzie lepsze niż cytowanie szeregu faktów podawanych przez różnych autorów w opisach ich prac badawczych, wykonywanych w odmiennych warunkach i przez to trudnych do porównania.

2. CEMENTY

Przedmiotem zainteresowania wytwórców prefabrykowanych elementów betonowych są cementy powszechnego użytku, a w określonych przypadkach również cementy specjalne: o podwyższonej odporności na działanie jonów siarczanowych - cementy HSR, niższej niż „normalnie” zawartości tlenków alkalicznych (Na_2O i K_2O) – cementy NA oraz o niskim ciepłe hydratacji – cementy LH wg PN-B-19707:2003.

Udziały poszczególnych rodzajów cementów wytwarzanych w Polsce w 2007 roku w całkowitej masie cementów powszechnego użytku przedstawiono na rysunku 1. W roku 2008 znacznie wzrósł w stosunku do 2007 roku udział cementów CEM II. Porównanie ilości wyprodukowanych w Polsce poszczególnych rodzajów cementów w latach 2007 - 2008 podano w tablicy 1 na podstawie www.polskicement.pl.



Rys. 1. Udział poszczególnych rodzajów cementów w całkowitej masie cementów powszechnego użytku wyprodukowanych w Polsce w 2007 roku [4]
 Fig. 1. Percentage of particular cement types in the total output of common cements produced in Poland in 2007 [4]

Tablica 1. Produkcja cementów w Polsce w latach 2007 - 2008
 Table 1. Cement production in Poland, 2007 - 2008

Rodzaj cementu	Ilość wyprodukowanego cementu [tys. ton]	
	2007	2008
CEM I 32,5	2 291,2	1 298,3
CEM I 42,5	3 711,7	3 837,1
CEM I 52,5	367,2	344,4
CEM II 32,5	7 162,8	7 723,5
CEM II 42,5	1 719,6	2 375,9
CEM III 32,5	1 049,7	935,3
CEM III 42,5	276,5	361,8
Inne	153,0	79,9
Cement ogółem	16 731,7	16 956,2

Wśród krajowych cementów CEM II dominują cementy portlandzkie popiołowe i cementy portlandzkie żuźlowe. Trudności w pozyskiwaniu dostatecznie dużych ilości żuźla wielkopieczowego oraz dobrej jakości krzemionkowych popiołów lotnych, skłonią zapewne w najbliższych latach producentów cementów do szerszego zainteresowania się innymi materiałami – wapieniami, popiołami wapiennymi oraz popiołami lotnymi z kotłów fluidalnych.

3. SKŁADNIKI GŁÓWNE CEMENTÓW MIESZANYCH PRODUKOWANYCH W POLSCE

3.1. UWAGI OGÓLNE

Składnikami głównymi cementów powszechnego użytku wytwarzanych w Polsce, poza klinkierem portlandzkim (K), którego skład chemiczny, fazowy oraz właściwości stanowią cechy charakterystyczne produktów każdej cementowni, są aktualnie: granulowany żużel wielkopieczowy (S), krzemionkowe popioły lotne (V) oraz wapień (LL).

Wymagania stawiane tym składnikom, nazywanym w literaturze anglojęzycznej supplementary cementitious materials, określa norma PN-EN 197-1:2002.

3.2. GRANULOWANY ŻUŻEL WIELKOPIECOWY

Podstawowe wymagania w stosunku do granulowanego żuźla wielkopieczowego są następujące:

- zawartość fazy szklistej w żużlu $\geq 2/3$,
- suma zawartości $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 \geq 2/3$,
- stosunek zawartości $(\text{CaO} + \text{MgO}) : \text{SiO}_2 > 1,0$.

Granulowany żużel wielkopieczowy jest materiałem o utajonych właściwościach hydraulicznych, ujawniających się po wprowadzeniu odpowiedniego aktywatora, którym w przypadku cementów żuźlowych jest przede wszystkim wodorotlenek wapnia stanowiący produkt reakcji z wodą podstawowych składników klinkieru portlandzkiego: alitu – $\text{C}_3\text{S}^{2)}$ i belitu – C_2S .

W celu uzyskania żużli o pożądanym właściwościach hydraulicznych, należy tak prowadzić proces ich granulacji, aby zawartość fazy szklistej była jak największa. Istotny jest również skład chemiczny żużli, który uzależniony jest przede wszystkim od zawartości i składu skały płonnej towarzyszącej rudzie żelaza.

²⁾ W artykule wykorzystano powszechnie używany w publikacjach poświęconych wytwarzaniu i stosowaniu cementów sposób zapisywania wzorów chemicznych, w którym: C = CaO, S = SiO₂, M = MgO, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃, H = H₂O, zaś uwodnione krzemiany wapnia, stanowiące produkty reakcji alitu (C₃S) i belitu (C₂S) z wodą, oznaczone są jako C-S-H

W Polsce wytapianie surówki żelaza prowadzone jest w Hucie Katowice oraz Hucie im. T. Sendzimira w Krakowie. Różnice składu chemicznego granulowanych żużli wielkopieczowych pochodzących z tych hut oraz wahania zawartości w nich fazy szklistej są niewielkie (tabl. 2). Podobny skład chemiczny i zbliżone właściwości posiadają również granulowane żużle wielkopieczowe importowane do Polski.

Tablica 2. Przykładowy skład chemiczny granulowanych żużli wielkopieczowych wytwarzanych w Polsce [5]

Table 2. Chemical composition of granulated blast furnace slags produced in Poland [5]

Składnik	Zawartość [% (m/m)]	
	Huta Katowice	Huta im. T. Sendzimira
CaO	44,2	43,0
SiO ₂	38,6	40,0
Al ₂ O ₃	8,5	8,1
MgO	6,1	6,0
Fe ₂ O ₃	0,8	0,8
SO ₃	1,9	2,0
Faza szklista	> 90	> 85

3.3. POPIOŁY LOTNE W CEMENTACH POWSZECHNEGO UŻYTKU

3.3.1. Uwagi ogólne

Wymagania stawiane popiołom lotnym, które mogą być wykorzystane do produkcji cementów powszechnego użytku ulegały w czasie wielu zmianom, które to zmiany będą miały zapewne „ciąg dalszy”. Norma PN-EN 197-1:2002 w swej pierwotnej wersji definiowała popiół lotny jako materiał „otrzymywany przez elektrostatyczne lub mechaniczne osadzanie pylistych cząstek spalin z palenisk opalanych pyłem węglowym”, dodając, że „popiół otrzymywany innymi metodami nie powinien być stosowany w cemencie zgodnym z EN 197-1”. W postanowieniach ogólnych wspomnianej normy wyróżniono popioły krzemionkowe (V), wykazujące właściwości pucolanowe i popioły wapienne, które „mogą wykazywać dodatkowo właściwości hydrauliczne” oraz ograniczono straty prażenia obydwu rodzajów popiołów do 5 % (m/m). Norma dopuszczała również popioły lotne, w których straty prażenia zawarte były w przedziale 5 ÷ 7 % (m/m), pod warunkiem, że „poszczególne wymagania dotyczące trwałości, szczególnie mrozoodporności i kompatybilności z domieszkami są spełniane zgodnie z odpowiednimi w miejscu stosowania normami i/lub przepisami dotyczącymi betonu lub zaprawy”.

„Zmiana do Polskiej Normy PN-EN 197-1:2002/A3” wprowadzona w sierpniu 2007 roku przetworzyła omawiany fragment normy PN-EN 197-1:2002. Autorzy zmiany odwołali się do definicji popiołu lotnego zawartej w normie EN-450-1, która w polskiej wersji tej normy PN-EN 450-1 stwierdza, że popiół lotny jest „drobno uziarnionym pyłem, składającym się głównie z kulistych, zeszkliwionych ziaren, otrzymywanych przy spalaniu pyłu węglowego, przy udziale lub bez udziału materiałów współspalanych, wykazujący właściwości pucolanowe i zawierający przede wszystkim SiO_2 i Al_2O_3 , przy czym zawartość reaktywnego SiO_2 , określona i opisana w EN 197-1, wynosi co najmniej 25 % (m/m)”. Materiałami, które zgodnie z normą PN-EN 450-1+A1:2009 mogą być współspalane z węglem są:

- materiały roślinne takie jak: wióry drzewne, słoma, łupiny i inne włókna roślinne,
- drewno i biomasa z upraw,
- odpady zwierzęce,
- osady ze ścieków komunalnych,
- odpady papiernicze i makulatura,
- koks porafinacyjny,
- bezpopiołowe paliwa płynne i gazowe.

Wspomniana norma PN-EN 450-1 podkreśla, że minimalna zawartość paliwa węglowego w odniesieniu do całkowitej suchej masy paliwa nie powinna być mniejsza niż 80 %, a zawartość popiołu pochodzącego z materiałów współspalanych nie powinna przekraczać 10 % całkowitej masy popiołu oraz, że popioły lotne wytwarzane przy użyciu innych typów materiałów współspalanych lub paliw o wyższych ich zawartościach, dających ponad 10 % całkowitej masy popiołów paliwa, nie powinny być stosowane jako składnik główny cementów powszechnego użytku.

Kolejną, ważną zmianą było dopuszczenie do wykorzystania jako składnika głównego cementów trzech kategorii popiołów lotnych, których straty prażenia wynoszą:

- nie więcej niż 5 % masy popiołu w stanie suchym,
- od 2 do 7 % masy popiołu,
- od 4 do 9 % masy popiołu.

Zmiana normy PN-EN 197-1:2002/A3 dopuszczała do użycia jako dodatku do cementów również popioły lotne, których straty prażenia były wyższe niż 9 % (m/m), pod warunkiem, że spełnione zostaną wymagania dotyczące trwałości, szczególnie mrozoodporności oraz kompatybilności z domieszkami zgodne z odpowiednimi w miejscu stosowania normami i/lub przepisami dotyczącymi betonu lub zaprawy.

Zmiany w treści normy PN-EN 197-1:2002 miały niewątpliwie tę zaletę, że definicja popiołu lotnego była taka sama jak definicja zawarta w normie PN-EN 450-1+A1:2009, dotyczącej popiołu lotnego stosowanego w produkcji betonów jako

dodatek typu II oraz, że zezwalała w sposób jednoznaczny na zastosowanie w procesie wytwarzania cementów nie tylko „czystych” popiołów węglowych, ale również popiołów otrzymywane w wyniku współspalania węgla i określonych biopaliw.

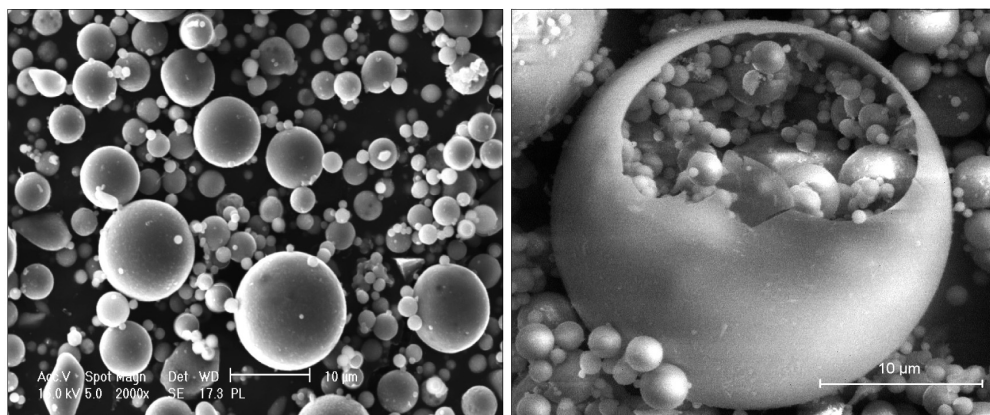
Znaczne wątpliwości budziło natomiast dopuszczenie do stosowania jako składnika głównego cementów powszechnego użytku popiołów lotnych o niepokojąco wysokich stratach prażenia, co w istotny sposób pogorszyłoby szereg właściwości użytkowych cementów, a tym samym zapraw i betonów, między innymi ich cechy reologiczne, wytrzymałość, mrozoodporność oraz oddziaływanie z domieszkami chemicznymi [6].

Zmiana do Polskiej Normy PN-EN 197-1:2002/A3 została w lutym 2008 wycofana „bez zastąpienia” [7]. Aktualną wersją omawianej normy pozostaje zatem PN-EN 197-1:2002 w brzmieniu sprzed sierpnia 2007 roku, a definicje popiołów lotnych i wymagania w stosunku do nich zawarte w początkowej części niniejszego rozdziału są nadal aktualne.

Norma PN-EN 197-1:2002, jak już wspomniano, wyróżnia i definiuje dwa rodzaje popiołów lotnych: popiół lotny krzemionkowy (V) oraz popiół lotny wapienny (W). Popioły te poza wymaganiami omówionymi wyżej muszą spełniać szereg wymagań szczegółowych, odmiennych dla danego rodzaju popiołu. Obydwa rodzaje popiołów wytwarzane są w Polsce, jednak jako składnik cementów powszechnego użytku stosowany jest tylko popiół krzemionkowy.

3.3.2. Popiół lotny krzemionkowy

Popiół lotny krzemionkowy składa się głównie z cząstek kulistych o wymiarach z reguły mniejszych niż 30 μm (rys. 2).



Rys. 2. SEM. Mikrofotografie kulistych form krzemionkowego popiołu lotnego
Fig. 2. SEM. Micrograph of spherical grains of siliceous fly ash particles

Jako podstawowe składniki popiołu krzemionkowego w normie PN-EN 197-1 wymienia się reaktywny dwutlenek krzemu SiO_2 oraz tlenek glinu Al_2O_3 , zaznaczając, że popiół zawiera również tlenek żelaza Fe_2O_3 i inne związki. Jest to bardzo uproszczona ocena składu popiołu. Dane dotyczące składu fazowego krzemionkowych popiołów lotnych zestawiono w dalszej części opracowania. W popiołach krzemionkowych dominuje zdecydowanie faza szklista, która stanowi zazwyczaj ponad 60 % całkowitej masy popiołu. Spośród faz krystalicznych obecnych w omawianych popiołach wymienić należy przede wszystkim mullit $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, β -kwarc $\beta\text{-SiO}_2$ oraz występujące w znacznie mniejszych ilościach hematyt Fe_2O_3 i magnetyt Fe_3O_4 .

Rozwijając definicję krzemionkowego popiołu lotnego zawartą w normie PN-EN 197-1:2002 jej autorzy stwierdzają, że:

- udział reaktywnego CaO w popiele powinien być ≤ 10 % (m/m),
- zawartość wolnego CaO $\leq 1,0$ % (dopuszcza się popioły, w których zawartość wolnego CaO wynosić będzie $1,0 \div 2,5$ % (m/m). pod warunkiem, że popiół taki spełniać będzie wymagania dotyczące stałości objętości),
- zawartość reaktywnego SiO_2 powinna być ≥ 25 % (m/m).

Ponieważ węgiel kamienny po wydobyciu poddawany jest wzbogacaniu, różnice pomiędzy składem chemicznym węgla pochodzących z kopalni tego samego zagłębia węglowego, a tym samym popiołów są niewielkie. Przykładowe składy chemiczne popiołów lotnych z polskich węgla kamiennych podano w tablicy 3.

Tablica 3. Przykładowe składy chemiczne krzemionkowych popiołów lotnych wytwarzanych w Polsce [8]

Table 3. Chemical composition of siliceous fly ash produced in Poland [8]

Składnik	Zawartość [% (m/m)]	
	Górnosląskie Zagłębie Węglowe	Lubelskie Zagłębie Węglowe
Straty prażenia	2,7	2,5
SiO_2	53,3	52,4
Al_2O_3	25,2	31,8
Fe_2O_3	7,4	7,0
CaO	3,9	1,0
MgO	2,8	1,4
Na_2O	1,2	0,5
K_2O	3,0	2,6
SO_3	0,5	0,8

3.4. WAPIEŃ (L, LL)

Wapień pozostaje w Polsce nadal niedocenianym składnikiem głównym cementów powszechnego użytku. Na „przyszłościowy” charakter produkcji cementów zawierających duże ilości CaCO_3 , zwróciła uwagę między innymi *Scrivener* [9], podkreślając, że wapień stanowi największą „rezerwę materiałową”, którą można zagospodarować w przemyśle cementowym w skali globalnej.

Norma PN-EN 197-1 wyróżnia dwa typ wapieni:

- wapień LL,
- wapień L.

Wymagania dla wspomnianych wapieni zawarte w omawianej normie są następujące:

- zawartość CaCO_3 w wapieniu powinna wynosić co najmniej 75 % (m/m),
- zawartość zanieczyszczeń ilastych w wysuszonym wapieniu nie powinna przekraczać 1,2 % (m/m),
- całkowita zawartość węgla organicznego (TOC) w wapieniu LL powinna być $\leq 0,2$ % (m/m), zaś w wapieniu L $\leq 0,5$ % (m/m).

4. WŁAŚCIWOŚCI CEMENTÓW WIELOSKŁADNIKOWYCH PRODUKOWANYCH W POLSCE

4.1. KLASYFIKACJA

Przedmiotem handlu na polskim rynku są następujące cementy wieloskładnikowe:

- Cementy CEM II:
 - Cementy portlandzkie popiołowe:
 - CEM II/A-V 42,5R,
 - CEM II/B-V 32,5R,
 - CEM II/B-V 32,5R-HSR,
 - Cementy portlandzkie żuźłowe:
 - CEM II/A-S 42,5N,
 - CEM II/A-S 42,5R,
 - CEM II/B-S 32,5R,
 - CEM II/B-S 42,5N,
 - CEM II/B-S 42,5N-NA,
 - CEM II/B-S 42,5R,
 - CEM II/B-S 52,5N,

- Cement portlandzki wapienny:
CEM II/A-LL 42,5R,
- Cementy portlandzkie wieloskładnikowe:
CEM II/B-M(S-V) 32,5R,
CEM II/B-M(S-LL) 32,5R,
CEM II/B-M(V-LL) 32,5R,
- Cementy hutnicze CEM III:
CEM III/A 32,5N,
CEM III/A 32,5N-NA,
CEM III/A 32,5N-LH-HSR/NA,
CEM III/A 42,5N,
CEM III/A 42,5N-HSR/NA,
CEM III/B 32,5L-LH,
- Cement wieloskładnikowy CEM V:
CEM V/A(S-V) 32,5N-LH.

Część spośród wymienionych wyżej cementów spełnia nie tylko wymagania normy PN-EN 197-1, ale również wymagania stawiane cementom specjalnym w normie PN-B-19707.

Wprowadzenie do układów „cement - woda” popiołów lotnych, granulowanych żużli wielkopiecowy, czy też zmielonego wapienia w różny sposób wpływa na procesy zachodzące we wspomnianych układach, a tym samym na właściwości zaczynów cementowych, zapraw i betonów, gdyż każdy z wymienionych dodatków ma inny skład chemiczny i inne właściwości, inaczej też zachowuje się w środowisku hydratyzujących minerałów klinkierowych.

4.2. CEMENTY ZAWIERAJĄCE GRANULOWANY ŻUŻEL WIELKOPIECOWY

Cementy zawierające granulowany żużel wielkopiecowy są wytwarzane w wyniku wspólnego mielenia wszystkich składników lub mieszania oddzielnie zmielonego żużla z pozostałymi składnikami tworzącymi cement.

Hydratacja żużla w układzie „żużel wielkopiecowy - woda” przebiega wolno. W wyniku reakcji szkliwa żużlowego z wodą na powierzchniach ziaren żużla powstają warstewki żelu krzemionkowo-glinowego, który spaja ziarna. W układzie „żużel wielkopiecowy - klinkier portlandzki - woda” szybkość zachodzących reakcji jest znacznie większa. Zasadowość (pH) zaczynu bardzo szybko osiąga poziom

12,5 ÷ 12,8. Następuje zniszczenie pierwotnej warstewki żelu krzemionkowo-glinowego zalegającego na ziarnach żużla i przyspieszenie hydratacji. Produkty hydratacji żużla wchodzi w reakcje z produktami reakcji minerałów klinkierowych z wodą, tworząc uwodnione krzemiany wapnia zawierające liczne podstawienia izomorficzne kationów Si^{4+} jonami Al^{3+} . Obecność gipsu w omawianym układzie prowadzi do powstania w początkowej fazie hydratacji ettringitu $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$, a następnie uwodnionego monosiarczanu wapnia $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot11\text{H}_2\text{O}$. Po związaniu całej ilości jonów siarczanowych, przy dostatecznie dużym stężeniu $\text{Ca}(\text{OH})_2$, powstają również uwodnione gliniany wapnia [10].

Różnice pomiędzy cementem portlandzkim CEM I a cementami portlandzkimi żużłowymi CEM II i cementami hutniczymi CEM III, narastają wraz ze wzrostem w nich zawartości żużla.

Cementy zawierające granulowany żużel wielkopiecowy charakteryzują się mniejszym ciepłem hydratacji i mniejszym skurczem [2, 11], ich wytrzymałość narasta wolniej, lecz przyrosty wytrzymałości zapraw i betonów obserwowane są przez znacznie dłuższy okres czasu niż w przypadku cementów portlandzkich CEM I. Zaprawy i betony z cementów zawierających żużle mają dobre właściwości reologiczne. Wytworzone z nich betony charakteryzują się znacznie większą odpornością na działanie czynników agresywnych chemicznie (korozja siarczanowa) niż betony, do produkcji których użyto cementów portlandzkich CEM I. Obecność żużla zmienia mikrostrukturę warstwy kontaktowej zaczyn cementowy - kruszywo, która staje się bardziej zwarta i uboższa w portlandyt niż w betonach wykonanych z cementu CEM I. W poprawnie przygotowanych zaprawach i betonach nie obserwuje się podczas ich zagęszczania wydzielania mleczka cementowego (bleending). Wzrost zawartości żużla w cemencie zmniejsza ekspansję zapraw spowodowaną reakcją alkaliczną kruszywa [2] oraz ogranicza możliwości uszkodzeń betonów spowodowane opóźnionym powstaniem ettringitu [12 - 13]. Należy zaznaczyć, że doniosłą rolę w kształtowaniu przyrostów wytrzymałości zapraw i betonów z cementów żużlowych odgrywa rozdrobnienie żużla. Szybkość narastania wytrzymałości cementów żużlowych o dostatecznie dużej powierzchni właściwej, CEM II/A-S i CEM II/B-S w klasach wytrzymałości 42,5R i 52,5R nie odbiega od szybkości przyrostów wytrzymałości cementów portlandzkich CEM I. Cementy takie mogą być z powodzeniem użyte do produkcji różnego typu prefabrykatów betonowych, w tym również do wytwarzania „galanterii betonowej”.

Częstym tematem dyskusji w przypadku cementów hutniczych CEM III jest problem pasywacji stali zbrojeniowej. W starych, nieodpowiednio zagęszczonych betonach zawierających „grubo zmielony” żużel hutniczy korozja stali zbrojeniowej obserwowana była bardzo często, podczas gdy w równie starych, szczelnych betonach o zbliżonym udziale żużla, spotykana jest rzadko [10]. Aktualnie przeważa pogląd, że cementy zawierające granulowany żużel wielkopiecowy mogą być stosowane do wykonywania żelbetowych konstrukcji podobnie, jak cement portlandzki CEM I, gdyż podstawowym problemem w zapewnieniu trwałości betonu zbrojonego nie jest mniejsza zawartość CaO w żużlu wielkopiecowym niż w klinkierze portlandzkim,

lecz szczelność betonu, a tę przy dostatecznie dużym rozdrobnieniu żużla zapewniają dodatkowe ilości tworzących się uwodnionych krzemianów wapnia C-S-H o dostatecznie wysokim pH.

Brak jest jednoznacznych ocen odporności betonów i zapraw z cementów hutniczych na ich karbonatyzację. Przeważa pogląd, że karbonatyzacja znacznie ogranicza trwałość tego rodzaju betonów.

Cementy zawierające duże ilości żużla są szczególnie wrażliwe na oddziaływanie temperatury. Nie należy stosować ich w niskich temperaturach. Cementy zawierające do 50 % żużla posiadają zazwyczaj dostateczną mrozoodporność, którą można podwyższyć poprzez wprowadzenie domieszek napowietrzających, zmniejszenie współczynnika w/c oraz zapewnienia dobrych warunków wstępnego dojrzewania [10]. Odporność betonów wykonanych z cementów zawierających żużel wielkopieczowy na złuszczenia, w przypadku stosunkowo krótkiej pielęgnacji przed poddaniem ich działaniu niskich temperatur, jest uzależniona w znacznym stopniu od zawartości żużla w cemencie [14]. Wydłużenie okresu pielęgnacji przed poddaniem betonów działaniu niskich temperatur (zapewnienie dostatecznie długiej hydratacji cementów żużlowych) do co najmniej trzech miesięcy, znacznie poprawia omawiane właściwości betonu.

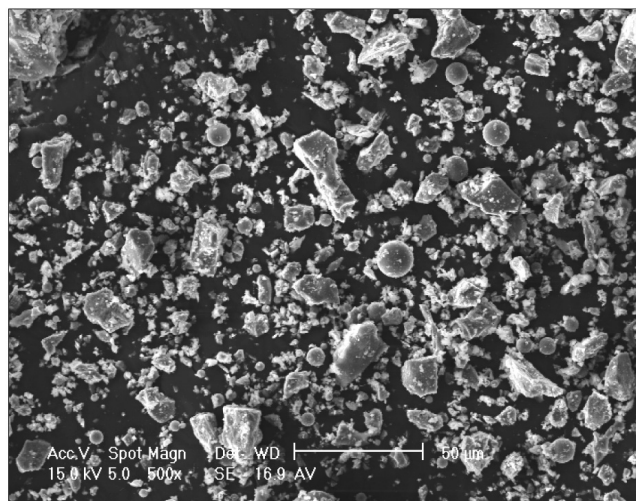
Odporność zapraw i betonów przygotowanych z cementów zawierających żużle wielkopieczowe uzależniona jest również od składu fazowego klinkieru portlandzkiego użytego do ich wytworzenia. Wzrost zawartości C_3A w klinkierze obniża odporność omawianych cementów na działanie czynników agresywnych, zwłaszcza siarczanów. Obecność żużla w cemencie nie powoduje wzrostu wodożądności zapraw i betonów oraz ogranicza kontrakcję zaczynu cementowego podczas twardnienia. Jedną z zalet cementów o dużej zawartości granulowanego żużla wielkopieczowego jest ich jasna barwa.

4.3. CEMENTY ZAWIERAJĄCE KRZEMIONKOWY POPIOŁ LOTNY

Cementy zawierające popiół lotny mogą być wytwarzane podobnie jak cementy żużłowe i cementy hutnicze, poprzez wspólnie mielenie popiołu z klinkierem portlandzkim i gipsem lub w wyniku mieszania popiołu lotnego z klinkierem portlandzkim zmielonym wraz z gipsem. Należy zaznaczyć, że zdecydowana większość kulistych form ziarnowych, które dominują w krzemionkowych popiołach lotnych, zachowuje swoje pierwotne kształty i nie ulega rozkruszeniu podczas mielenia (rys. 3).

Najbardziej aktywnym w środowisku alkalicznym składnikiem krzemionkowych popiołów lotnych jest szkliwo glinokrzemianowe, tworzące lite lub skorupowe formy kuliste o średnicach $\leq 100 \mu\text{m}$. Występujące w popiołach krzemionkowych fazy krystaliczne są w normalnych warunkach niemal inertne i spełniają przede wszystkim rolę mikrokruszywa. W początkowym stadium hydratacji, z wodą reagują składniki klinkieru portlandzkiego, a przechodzący do roztworu wodorotlenek wapnia wchodzi w reakcję z aktywnymi składnikami szkliwa popiołowego – SiO_2 i Al_2O_3 , tworząc

C-S-H i C-S-A-H, które wspólnie z produktami hydratacji minerałów klinkierowych spajają zaprawę i beton. Reakcje pucolanowe przebiegają z niewielką szybkością i można przyjąć, że w początkowych okresach twardnienia zapraw i betonów popiół spełnia rolę quasiinertnego wypełniacza, a jego rola jako aktywnego chemicznie „uczestnika” hydratacji obserwowana jest po kilkunastu lub kilkudziesięciu dniach [15]. Znaczący wpływ popiołu lotnego na wytrzymałość zapraw i betonów zaznacza się zazwyczaj po upływie 28, a niekiedy 90 dni.



Rys. 3. SEM. Mikrofotografie cementu CEM II/B-V 42,5R. Wśród ziaren cementu widoczne kuliste ziarna krzemionkowego popiołu lotnego

Fig. 3. SEM. Micrograph of CEM II/B-V 42,5R. Spherical fly ash grains visible among the cement particles

Wprowadzenie popiołu lotnego do cementu zmienia wiele cech użytkowych spoiwa. Skala zmian uzależniona jest od szeregu czynników, z których najważniejszymi są: jakość popiołu lotnego, jego ilość oraz właściwości klinkieru portlandzkiego. Oceniając jakość popiołu lotnego należy brać pod uwagę przede wszystkim jego aktywność pucolanową, uziarnienie (miałkość) oraz zawartość w nim niespalonego węgla. Czas wiązania cementów popiołowych jest dłuższy niż badanych w tych samych warunkach cementów portlandzkich CEM I i wzrasta wraz ze zwiększającą się zawartością popiołu lotnego w cemencie. Narastanie wytrzymałości cementów popiołowych następuje wolniej niż CEM I, jednak znaczące przyrosty wytrzymałości zapraw i betonów wykonanych tych cementów obserwowane są również po dłuższych okresach czasu dojrzewania. Po dostatecznie długich okresach czasu zaprawy i betony wykonane z cementów popiołowych wykazują wyższą wytrzymałość niż zaprawy i betony z cementu CEM I, pod warunkiem właściwie prowadzonej pielęgnacji. Ilość wydzielającego się ciepła podczas hydratacji cementów popiołowych jest mniejsza niż

w przypadku CEM I, co ogranicza naprężenia termiczne i jest szczególnie ważne w przypadku betonów masywnych. Zaletami cementów popiołowych są również: wysoka odporność na działanie czynników agresywnych (pod warunkiem zastosowania odpowiedniego klinkieru portlandzkiego o ograniczonej zawartości C_3A), wysoka szczelność przygotowanych z nich zapraw oraz niski skurcz, który uzależniony jest od uziarnienia popiołu i zawartości w nim niespalonego węgla [10]. Wykorzystanie popiołów lotnych w procesie wytwarzania betonów jest również jednym ze skutecznych sposobów ograniczenia reakcji alkaliów z kruszywem [15].

Dobrej jakości krzemionkowe popioły lotne poprawiają właściwości reologiczne mieszanki betonowej („efekt łożyskowania”), zmniejszają wodożądność zapraw i betonów, umożliwiając uzyskanie pożądanej konsystencji mieszanki betonowej przy niższym współczynniku w/s , nie ograniczają również czasu zachowania właściwości roboczych zapraw [15]. Poprawa wymienionych cech uwidacznia się szczególnie wyraźnie, gdy popioły wprowadzane są jako dodatek typu II do betonu. Obecność niespalonego węgla w popiele lotnym w negatywny sposób wpływa na niemal wszystkie cechy użytkowe zapraw i betonów, powoduje również wzrost zużycia domieszek chemicznych, wprowadzanych do mieszanki betonowej w celu zapewnienia jej pożądanych właściwości roboczych.

Betony przygotowane z cementów zawierających popioły lotne, mają na ogół niższą mrozodporność i odporność na działanie środków odladzających niż betony, do produkcji których zastosowano cement CEM I. Tę niedoskonałość można w znaczący sposób ograniczyć poprzez właściwe zaprojektowanie betonu, zmniejszenie w/c , odpowiednie napowietrzenie betonu i jego staranną pielęgnację [11]. Należy podkreślić, że porównanie cech użytkowych betonów zawierających popioły lotne z właściwościami betonów pozbawionych tego składnika należy dokonywać po dłuższych okresach czasu, niż 28 dni, gdyż popioły lotne znacznie wolniej wchodzą w reakcje chemiczne niż minerały klinkierowe.

Popioły lotne mogą wpływać również na barwę cementów, zapraw i betonów, zwłaszcza przy większych zawartościach w nich niespalonego węgla. Ta cecha może być istotnym elementem ich oceny, zwłaszcza wówczas, gdy obok siebie eksponowane są elementy budowlane wykonane z betonów zawierających różne ilości popiołu lotnego.

4.4. CEMENTY ZAWIERAJĄCE WAPIEŃ

Informacje dotyczące roli, jaką w procesach hydratacji minerałów klinkierowych i kształtowania cech użytkowych zapraw i betonów odgrywa węglan wapnia, są często sprzeczne, gdyż wpływ zmielonego wapienia uzależniony jest w dużym stopniu od jego składu chemicznego i uziarnienia [16]. Ocena aktywności węglanu wapnia w środowisku reagujących z wodą minerałów klinkierowych waha się od podkreślenia jego roli jako jednego z substratów reakcji, w wyniku której powstaje uwodniony monowęglanoglinian wapnia – $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$ [17], a stwierdzeniem, że węglan wapnia jest substancją praktycznie inertną i spełnia jedynie rolę wypełniacza [18].

Faktem jest, że zawartość $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ w zaczynach cementów wapiennych w normalnych warunkach jest znikoma, natomiast uwodniony monowęglanoglinian wapnia występuje niekiedy w znacznych ilościach wśród produktów karbonatyzacji zaczynu cementowego. Drobne cząstki wapienia spełniają w zaczynie cementowym rolę zarodków krystalizacyjnych produktów hydratacji minerałów klinierowych, przyspieszając hydratację C_3S , zwłaszcza w jej początkowym okresie, oraz intensyfikują rozrost warstw C-S-H [19]. Ilość i szybkość wydzielania się ciepła podczas hydratacji cementów wapiennych jest jednak mniejsza niż w układzie CEM I – woda. Obecność w cemencie drobno zmielonego wapienia pozbawionego zanieczyszczeń ilastych skraca czas wiązania i poprawia urabialność mieszanki betonowej, przyczyniając się do zwiększenia szczelności betonu oraz ograniczenia jego przepuszczalności. Możliwość zmniejszenia współczynnika w/c w zaprawach i betonach przygotowanych z udziałem cementów wapiennych skutkuje wzrostem ich wytrzymałości. Nie obserwuje się istotnych różnic w szybkościach postępu karbonatyzacji w betonach i zaprawach z cementów wapiennych i cementów portlandzkich CEM I [20]. Betony, do wyprodukowania których użyte zostały cementy wapienne, zwłaszcza cementy CEM II/L, charakteryzują się gorszą mrozoodpornością niż betony wykonane z użyciem cementów portlandzkich CEM I. Cementy wapienne bardzo dobrze sprawdzają się w zaprawach murarskich i tynkarskich. Jedną z ich zalet jest jasna barwa.

5. WŁAŚCIWOŚCI DODATKÓW TYPU II STOSOWANYCH DO PRODUKCJI BETONÓW

5.1. UWAGI OGÓLNE

Norma PN-EN 206-1 definiuje dodatek jako „drobnoziarnisty składnik stosowany do betonu w celu poprawy pewnych właściwości lub uzyskania specjalnych właściwości”. Dodatki typu II stanowią składniki aktywne, spełniające w betonie rolę sztucznej pucolany (popioły lotne, pyły krzemionkowe) lub dodatku hydraulicznego (mielone granulowane żużle wielkopieczowe), a także mikrokruszywa. Wymagania stawiane poszczególny dodatkom typu II zostały określone w odpowiednich normach PN-EN 450-1 i PN-EN 13263 oraz PN-EN 15167-1.

Aktywność w środowisku alkalicznym popiołów lotnych i pyłu krzemionkowego, traktowaną jako zdolność do substytucji części cementu w betonie, uwzględniono w normie PN-EN 206-1 poprzez wprowadzenia współczynnika k , który pozwala na etapie projektowania betonu obliczyć „poprawiony” wskaźnik w/c . W dotychczasowej wersji norma PN-EN 206-1:2003 nie uwzględnia współczynnika k w betonach z dodatkiem mielonego żużla wielkopieczowego. Wydaje się jednak, że zapowiadana nowelizacja omawianej normy umożliwi traktowanie żużla w podobny sposób, jak pozostałych dodatków typu II.

Wprowadzenie do betonu dodatków typu II nie powinno być traktowane jako prosta substytucja części cementu, ale jako element operacji technologicznej, prowadzącej do nadania betonom pożądanych cech użytkowych. Omawiane dodatki zmieniają cechy zaczynów cementowych oraz kinetykę zachodzących procesów, a tym samym właściwości użytkowe zapraw i betonów, powodując między innymi zwiększenie ich odporności na działanie czynników agresywnych i ograniczając ilość wydzielającego się ciepła. W Polsce, jako dodatek typu II do betonu stosowane są głównie popioły lotne. Pyły krzemionkowe wykorzystywane są w znacznie mniejszych ilościach, najczęściej do betonów wysokich klas wytrzymałościowych. Mielone granulowane żużle wielkopieczowe nie są aktualnie używane jako dodatek typu II do betonów.

5.2. POPIOŁY LOTNE JAKO DODATEK TYPU II DO BETONÓW

Wymagania dotyczące właściwości popiołów lotnych, które mogą być stosowane w betonach określa norma PN-EN 450-1, która definiuje popiół lotny jako „drobno uziarniony pył składający się głównie z kulistych, zeszkliwionych ziaren, otrzymanych przy spaleniu pyłu węglowego, przy udziale lub bez udziału materiałów współspalanych, wykazujący właściwości pucolanowe i zawierający przede wszystkim SiO_2 i Al_2O_3 , przy czym zawartość reaktywnego SiO_2 wynosi nie mniej niż 25 % (m/m)”. Zestawienie materiałów, które mogą być współspalane z węglem podano w rozdziale 3.3. Norma podkreśla, że popioły lotne przed użyciem ich jako dodatku do betonu mogą być poddane różnorodnej obróbce oraz, że mogą stanowić mieszaninę popiołów pochodzących z różnych źródeł, ale spełniających wymagania wspomnianej normy. Wymagania stawiane popiołom lotnym podano w tablicach 4 i 5.

Aktywność popiołów lotnych w środowisku hydratyzującego cementu uwzględniono w omawianej normie poprzez wprowadzenie współczynnika k , który w zależności od klasy wytrzymałości użytego cementu, może wynosić 0,2 (CEM I 32,5) lub 0,4 (CEM I 42,5 i CEM I 52,5). Maksymalną zawartość popiołu w betonie, która może być uwzględniana przy obliczeniach współczynnika woda/(cement + k · popiół lotny) określa zależność:

$$\text{popiół lotny/cement} \leq 0,33 \text{ (m/m)}.$$

Zawartość spoiwa w betonie (cement + k · popiół lotny) nie powinna być mniejsza niż zawartość cementu, która jest wymagana dla danej klasy ekspozycji betonu, zaś minimalną zawartość cementu w określonej klasie ekspozycji betonu można zmniejszyć maksymalnie o ilość równą wyrażeniu $k \cdot (\text{minimalna zawartość cementu} - 200) \text{ kg/m}^3$ betonu.

Krajowe uzupełnienie normy PN-EN 206-1 objęło tymi postanowieniami również cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A, poza cementem CEM II/A-V oraz klasami ekspozycji betonów XF2, XF3 i XF4 [21].

Tablica 4. Wymagania chemiczne dotyczące popiołów lotnych stosowanych jako dodatek typu II do betonów, zgodnie z PN-EN 450-1

Table 4. Standard requirements relating to the chemical composition of fly ash used as type II standard concrete additive, according to PN-EN 450-1

Oznaczany składnik	Zawartość [% (m/m)]		Norma wykonawcza
	Popiół otrzymany wyłącznie przez spalanie pyłu węglowego	Popiół otrzymany przy współspalaniu	
Straty prażenia:			PN-EN 196-2
• kategoria A	≤ 5		
• kategoria B	2,0 - 7,0		
• kategoria C	4,0 - 9,0		
Chlorki, Cl ⁻	≤ 0,10		PN-EN 196-2
SO ₃	≤ 3		PN-EN 196-2
CaO wolny	≤ 2,5		PN-EN 451-1
CaO reaktywny	≤ 10,0		PN-EN 197-1
SiO ₂ reaktywny	Oznaczenie nie jest konieczne Należy przyjąć, że wymaganie jest spełnione.	≥ 25,0	PN-EN 197-1
Suma zawartości SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃		≥ 70,0	PN-EN 196-2
MgO		≤ 4,0	PN-EN 196-2
Alkalia – Na ₂ O _{eq}		≤ 5,0	PN-EN 196-2
Rozpuszczalne związki fosforu, P ₂ O ₅		≤ 100 mg/kg	PN-EN 450-1 Załącznik C

W początkowym okresie twardnienia, popioły lotne w betonie spełniają głównie rolę mikrokruszywa, co jest szczególnie ważne w betonach, do wytwarzania których użyte zostały „grube” piaski [22]. Zmiany w mieszance betonowej dotyczą przede wszystkim wodożądności i urabialności. Dobrej jakości popioły lotne, zwłaszcza popioły kategorii S, zmniejszają wodożądność i poprawiają urabialność, umożliwiając również ograniczenie ilości wody niezbędnej do uzyskania określonej konsystencji betonu. Im mniejsza jest pozostałość popiołu na sicie # 45 μm, tym mniej wody należy wprowadzić do betonu, aby uzyskać pożądaną konsystencję. Uzupełnienie stosu kruszywowego materiałem drobnoziarnistym zapobiega również segregacji składników betonu i wydzielaniu się mlecza cementowego. Czas, po jakim w sposób wyraźny zaznacza się aktywność pucolanowa popiołów uzależniony jest w dużej mierze od ich uziarnienia. Popioły kategorii S wg PN-EN 450-1 reagują w Ca(OH)₂ znacznie szybciej niż popioły N.

Tablica 5. Wymagania dotyczące właściwości fizycznych popiołów lotnych stosowanych jako dodatek typu II do betonów, zgodnie z PN-EN 450-1
 Table 5. Standard requirements relating to the physical properties of fly ash used as type II standard concrete additive, according to PN-EN 450-1

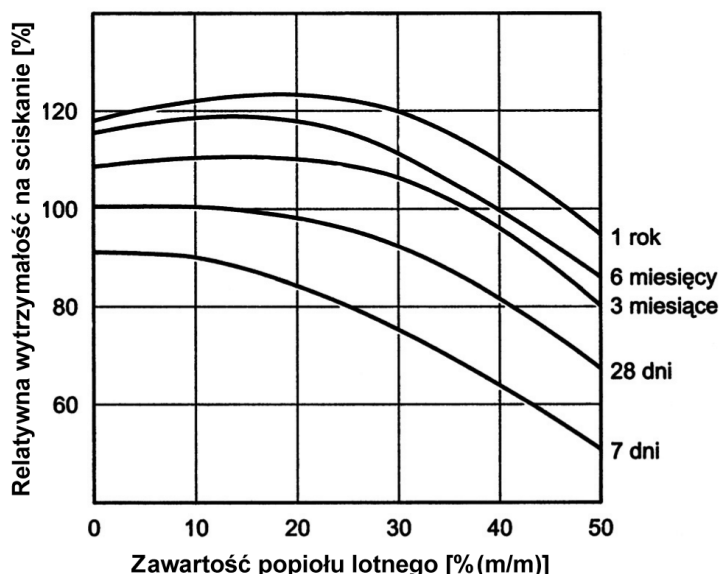
Oznaczana cecha	Wymagania	Norma wykonawcza
Miałość (pozostałość na sicie # 0,045 mm): • kategoria N • kategoria S	$\leq 0,40 \%$ (m/m) i $\leq \pm 10 \%$ wartości deklarowanej $\leq 0,12 \%$ (m/m)	PN-EN 451-2
Wskaźnik aktywności pucolanowej: – po 28 dniach – po 90 dniach	$\geq 75 \%$ $\geq 85 \%$	PN-EN 196-1
Stalność objętości	$\leq 10 \text{ mm}$	PN-EN 196-3
Gęstość	$\leq \pm 200 \text{ kg/m}^3$ wartości deklarowanej	PN-EN 196-6
Początek czasu wiązania	Początek czasu wiązania spoiwa o składzie: 25 % popiołu lotnego + 75 % cementu referencyjnego nie powinien być dłuższy więcej niż dwukrotnie od czasu wiązania cementu referencyjnego	PN-EN 196-1
Wodożądność	Wodożądność popiołu o miałości kategorii S $\leq 95 \%$ wodożądności cementu porównawczego	PN-EN 450-1 Załącznik B
Uwalnianie substancji niebezpiecznych i radioaktywność	Popiół lotny nie powinien zawierać substancji, które uwalniane z betonu są niebezpieczne dla zdrowia, higieny i środowiska	PN-EN 450-1 Załącznik A

Wpływ popiołu na właściwości stwardniałego betonu uzależnione są głównie od: jego zawartości w betonie, składu chemicznego, fazowego i ziarnowego popiołu, aktywności pucolanowej oraz od rodzaju i zawartości cementu, a także temperatury dojrzewania i warunków pielęgnacji betonu.

Zastąpienie części cementu popiołem lotnym zmienia dynamikę narastania wytrzymałości betonu i wydłuża czas wiązania. Wczesne wytrzymałości takich betonów są mniejsze, jednak po odpowiednio długim czasie betony zawierające popiół lotny mogą osiągnąć wytrzymałości większe niż betony bez tego dodatku (rys. 4).

Betony zawierające krzemionkowy popiół lotny wykazują podwyższoną odpornością na działanie czynników agresywnych, a przy właściwie prowadzonej pielęgnacji posiadają również wystarczającą mrozoodporność. Chcąc zapewnić zadawalającą mrozoodporność betonów, do których wprowadzone zostały znaczne ilości popiołu lotnego, należy tak prowadzić prace budowlane, aby okres, jaki upłynie od ich zakończenia do „pierwszego zamrożenia” betonu, był jak najdłuższy. Wydłużenie tego

okresu i odpowiednia pielęgnacja betonu umożliwiła długotrwałe działanie „mechanizmu pucolanowego”, który zapewnia niezbędny stopień przereagowania popiołu lotnego. Wytworzenie dostatecznych ilości C-S-H i C-S-A-H, warunkuje uzyskanie mikrostruktury betonu o znacznej odporności na zamrażanie i odmrażanie. Prace betoniarские prowadzone w niskich temperaturach, zbyt krótki okres pielęgnacji betonów zawierających popioły lotne oraz niewłaściwa ich pielęgnacja nie zabezpieczają wystarczającej mrozoodporności.



Rys. 4. Wpływ krzemionkowego popiołu lotnego na wytrzymałość betonów [10]
 Fig. 4. Effect of siliceous fly ash on the compressive strength of concrete [10]

5.3. PYŁY KRZEMIONKOWE JAKO DODATEK TYPU II DO BETONÓW

Powierzchnia właściwa (BET) pyłów krzemionkowych wynosi od kilkunastu tysięcy do około $20\,000\text{ m}^2/\text{kg}$, zaś ich gęstość nasypowa $150 \div 350\text{ kg/m}^3$. Podstawową frakcją ziarnową pyłów krzemionkowych są sferyczne formy amorficznego SiO_2 o średnicy $0,1 \div 0,2\ \mu\text{m}$ [23 - 24]. Pyły krzemionkowe mogą być wprowadzane do betonu w formie pylistej, zagęszczonej (granulki) lub jako szlam. O wyborze postaci, w jakiej są stosowane decyduje dostępność materiału, wyposażenie techniczne wytwórni betonu oraz względy organizacyjne i ekonomiczne. Wymagania dotyczące pyłów krzemionkowych używanych w produkcji betonów określa norma PN-EN 13263-1:2006 (tabl. 6 i 7).

Tablica 6. Wymagania chemiczne stawiane pyłom krzemionkowym stosowanym jako dodatki typu II do betonu, zgodnie z PN-EN 13263

Table 6. Standard requirements relating to the chemical composition of silica fume used as type II standard concrete additive, according to PN-EN 13263

Oznaczany składnik	Wymagania [% (m/m)]	Norma wykonawcza
Dwutlenek krzemu	≥ 80	PN-EN 196-2
Krzem pierwiastkowy	$\leq 0,4$	ISO 9286
Wolny tlenek wapnia	$\leq 1,0$	PN-EN 451-1
Siarczany wyrażone jako SO_3	$\leq 2,5$	PN-EN 196-2
Całkowita zawartość alkaliów	powinna być zadeklarowana przez dostawcę jako Na_2O_{eq}	PN-EN 196-2
Chlorki wyrażone jako Cl^-	$\leq 0,3$	PN-EN 196-2
Straty prażenia z poprawką na utlenianie siarczków	$\leq 4,0$	PN-EN 196-2

Tablica 7. Wybrane cechy fizyczne pyłów krzemionkowych stosowanych jako dodatek typu II w betonach, zgodnie z PN-EN 13263

Table 7. Physical properties of silica fume used as type II standard concrete additive, according to PN-EN 13263

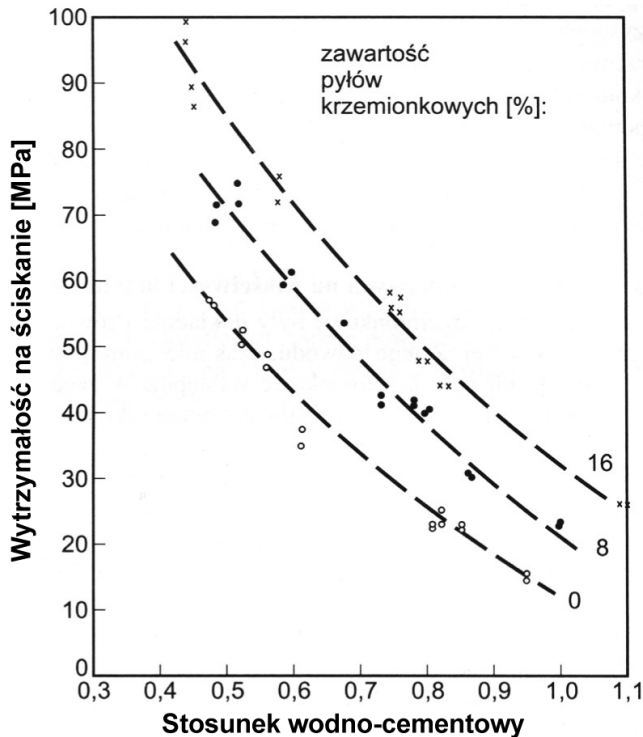
Oznaczana cecha	Wymagania	Norma wykonawcza
Powierzchnia właściwa	Powierzchnia właściwa BET $\geq 15,0 \text{ m}^2/\text{g}$ lecz $\leq 35,0 \text{ m}^2/\text{g}$	ISO 9277
Zawartość suchej masy w zawiesinie	Nie powinna różnić się od wartości deklarowanej o więcej niż $\pm 2 \%$ (m/m)	PN-EN 196-2
Wskaźnik aktywności po 28 dniach	$\geq 100 \%$	PN-EN 196-1

Zgodnie z normą PN-EN 206-1 współczynnik k dla pyłu krzemionkowego przyjmuje z reguły wartość 2. Jedynie w przypadku, gdy $w/c > 0,45$, a klasa ekspozycji betonu określona jest jako XC lub XF, wartość współczynnika k wynosi 1. Maksymalna zawartość pyłu krzemionkowego w betonie, jaka może być uwzględniona korekcji współczynnika woda/cement określa zależność:

$$\text{pył krzemionkowy/cement} \leq 0,11 \text{ (m/m)}.$$

Skorygowana poprzez współczynnik k zawartość spoiwa w betonie zawierającym pył krzemionkowy (cement + $k \cdot$ pył krzemionkowy) nie powinna być mniejsza niż zawartość cementu, wymagana dla danej klasy ekspozycji betonu.

Pył krzemionkowy spełnia w betonie rolę dodatku pucolanowego, a w początkowej fazie hydratacji, również funkcję mikro- i nanokruszywa. Kuliste cząstki pyłu ułatwiają przemieszczanie się większych od nich ziaren cementu i kruszyw oraz zagęszczają beton. Następuje poprawa urabialności betonu. Pył krzemionkowy szybko reaguje z $\text{Ca}(\text{OH})_2$ powstałym podczas hydratacji cementu tworząc C-S-H. W zaczynie, a tym samym w betonie, wzrasta zawartość uwodnionych krzemianów wapnia, maleje natomiast zawartość wodorotlenku wapnia oraz zmienia się wielkość i morfologia tworzących go kryształów. Zmiany te odgrywają ważną rolę w kształtowaniu strefy kontaktowej zaczynu z kruszywem. Obserwuje się zanik warstwy wzbogaconej w kryształy portlandytu i zagęszczenie strefy kontaktowej. Betony zawierające pyły krzemionkowe wykazują wyższą wytrzymałość przy takim samym w/c niż betony bez dodatków (rys. 5), wyższy moduł sprężystości Younga, lepszą przyczepność do zbrojenia i „starego” betonu oraz mniejsze pęcznienie [25 - 26].



Rys. 5. Zależność wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach twardnienia od stosunku w/c oraz zawartości pyłu krzemionkowego [26]

Fig. 5. Compressive strength of concrete after 28 days maturing as a function of w/c ratio and silica fume content [26]

Wprowadzenie pyłów krzemionkowych do betonów wywiera znaczący wpływ na trwałość betonów, zmniejsza ich przepuszczalność, zwiększa odporność na działanie czynników agresywnych chemicznie, zapobiega pęcznieniu alkalicznemu, ogranicza ścieralność oraz postępowanie karbonatyzacji [26].

Stosowanie pyłu krzemionkowego w produkcji betonów stwarza jednak szereg trudności, zwłaszcza w ich transporcie i dozowaniu. Betony, do których wprowadzono pyły krzemionkowe wymagają użycia większych ilości plastyfikatorów, obserwuje się trudności w pompowaniu oraz napowietrzaniu betonu. Obecność pyłu krzemionkowego w betonie, zwłaszcza po przekroczeniu określonego optimum, może spowodować pogorszenie mrozoodporności oraz przyspieszyć korozję stali zbrojeniowej. Bardzo ważna jest właściwie prowadzona pielęgnacja omawianych betonów.

Pyły krzemionkowe są ważnym składnikiem betonów wysokowartościowych, zwłaszcza lekkich, w których zwiększenie lepkości mieszanki zapobiega segregacji składników betonu oraz umożliwia osiągnięcie wysokich wytrzymałości. Istotną rolę odgrywają również w produkcji betonów samozagęszczalnych oraz spoiw specjalnych i betonów „nowej generacji”. Jako przykłady tego typu materiałów można wymienić między innymi drobno zdyspergowane spoiwa DSP (ang. *Densified Systems with Ultra Fine Particles*), betony z proszkiem reaktywnym RPC (ang. *Reactive Powder Concrete*) oraz DUCTAL[®], który obok składników typowych dla RPC zawiera również makrowłókna stalowe lub organiczne oraz mikrowłókna mineralne. Zawartości pyłów krzemionkowych w RPC często przekracza 1/3 zawartości cementu w tych betonach [25].

5.4. MIELONY GRANULOWANY ŻUŻEL WIELKOPIECOWY

Mielony granulowany żużel wielkopiecowy stanowi przedmiot normy PN-EN 15167. Żużel ten nie jest aktualnie wykorzystywany jako dodatek typu II do betonu. Jak już wspomniano, jest w całości zagospodarowywany przez przemysł cementowy, gdzie stanowi składnik główny kilku rodzajów cementów wieloskładnikowych. Granulowane żużle wielkopiecowe są jednak dostępne na rynku, jako półprodukt powstały w instalacjach przemysłowych, w których w początkowej fazie produkcji cementu hutniczego lub żużlowego mielone są oddzielnie klinkier portlandzki i granulowany żużel wielkopiecowy.

Istotną rolę w wykorzystaniu mielonych granulowanych żużli wielkopiecowych jako dodatku do betonów, poza spełnieniem określonych uwarunkowań ekonomicznych (cena mielonego żużla jest relatywnie wysoka), odegrałaby zapewne nowelizacja normy PN-EN 206-1, polegająca na określeniu dla wspomnianych żużli właściwego współczynnika k .

Problemy związane z wykorzystaniem żużla wielkopiecowego jako dodatku typu II do betonu stanowią także w Polsce temat badań i w sposób bardzo interesujący zostały przedstawione w publikacji [27].

6. POPIOŁ LOTNY Z KOTŁÓW FLUIDALNYCH

Popioły lotne z kotłów fluidalnych znacznie różnią się od konwencjonalnych popiołów lotnych i, jak już wspomniano, nie są ujęte w normach PN-EN 197-1 i PN-EN 206-1, nie spełniają również wymagań zawartych w normie PN-EN 450-1. Uboczne produkty spalania powstające w kotłach fluidalnych poszczególnych instalacji przemysłowych znacznie różnią się między sobą. Zaznaczająca się jednak pewna stabilizacja składu chemicznego i fazowego popiołów lotnych wytwarzanych w dużych elektrowniach oraz doświadczenia w ich wykorzystaniu do produkcji kostki brukowej, przemawiają za tym, aby popioły te, po spełnieniu określonych warunków ich stosowania, traktować jako potencjalny składnik spoiw drogowych, a być może także betonów [28 - 29]. Popioły lotne z kotłów fluidalnych stanowią aktualnie przedmiot intensywnie prowadzonych prac w wielu ośrodkach badawczych.

Względnie niska temperatura panująca w złożu fluidalnym (około 850°C) powoduje, że podczas spalania paliw nie pojawia się praktycznie faza ciekła. Popioły lotne z kotłów fluidalnych są bardzo słabo spieczone i składają się głównie z nieregularnych ziaren zdehydratyzowanych i zdehydroksylowanych minerałów tworzących pierwotnie skały płonne, mają niemal amorficzną strukturę i wykazują znaczną aktywność pucolanową. Występuje w nich anhydryt oraz „międko palony” tlenek wapnia szybko wchodzący w reakcję z wodą. Nie obserwuje się natomiast fazy szklistej, stanowiącej podstawowy składnik konwencjonalnych popiołów lotnych, nie występuje także mullit – $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. W popiołach lotnych z kotłów fluidalnych nie stwierdza się również obecności charakterystycznych dla konwencjonalnych popiołów lotnych kulistych form ziarnowych [30 - 32]. Dłuższe składowanie popiołów powoduje stopniowy zanik CaO i wzrost zawartości węglanu wapnia, stanowiącego wynik reakcji tlenku wapnia z dwutlenkiem węgla zawartym w powietrzu.

Porównanie składu fazowego popiołów lotnych otrzymywanych w kotłach fluidalnych i konwencjonalnych popiołów lotnych przedstawiono w tablicy 8.

Odmienne cechy morfologiczne popiołów lotnych z kotłów fluidalnych oraz popiołów lotnych z kotłów konwencjonalnych są znaczące, co wyraźnie uwidacznia się na zdjęciach wykonywanych podczas obserwacji prowadzonych za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego SEM (rys. 6 i 7).

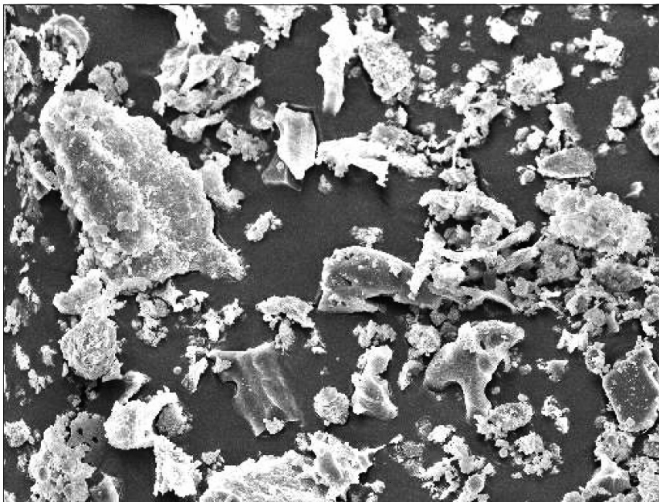
Produkty hydratacji cementów zawierających popioły lotne z kotłów fluidalnych są wzbogacone w C-S-H i C-S-A-H oraz fazy siarczanowe (ettringit i monosulfat), co w istotny sposób wpływa na mikrostrukturę zaczynu. Zaczyny cementowe, a także zaprawy i betony zawierające omawiane popioły są mniej przepuszczalne i bardziej zwarte niż produkty powstałe w wyniku przebiegającej w takich samych warunkach hydratacji cementu portlandzkiego CEM I. Duża aktywność popiołów lotnych z kotłów fluidalnych w środowisku hydratyzującego cementu zapewnia szybkie przyrosty wytrzymałości zapraw i betonów, a także ich wysoką odporność na działanie czynników korozyjnych. Mankamentem cementów z udziałem omawianych popiołów jest ich wysoka wodożądność, co przy zachowanie niezmięnionej konsystencji wymaga wprowadzenia do betonu większych ilości domieszek chemicznych i zwiększa koszty produkcji betonu.

Tablica 8. Porównanie składu fazowego popiołów lotnych z cyrkulacyjnych kotłów fluidalnych pracujących pod ciśnieniem atmosferycznym (CAFBC) ze składem fazowym konwencjonalnych popiołów lotnych z węgla kamiennego [32]

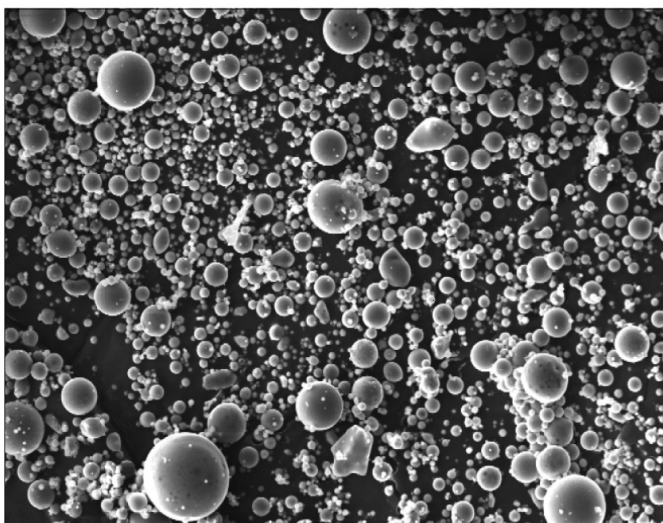
Table 8. Phase composition of fly ash from circulation fluidized bed combustion (CAFBC) as to compared to the phase composition of fly ash produced by the black coal combustion in conventional installation [32]

Składnik popiołu lotnego	Rodzaj odpadu	
	Popiół lotny z kotłów fluidalnych	Popiół lotny z kotłów konwencjonalnych
Substancja szklista [% (m/m)]	0	> 60 %
Mullit [% (m/m)]	0	~ 20 %
Semiamorficzna substancja glinokrzemianowa	++	+
Wapno nieaktywne	0	+
Wapno reaktywne	++	m
Peryklaz	m	+
Magnetyt	+	+
Anhydryt	++	+
Kalcyt	m	m
Kwarc	++	++
Niespalony węgiel	+	+
Larnit o silnie zdefektowanej strukturze	m	0

Oznaczenia:
 ++ składnik główny, + składnik drugorzędny, m – składnik podrzędny, 0 – nie występuje.



Rys. 6. SEM. 500×.
 Mikrofotografia popiołu lotnego z cyrkulacyjnego kotła fluidalnego
 Fig. 6. SEM. 500×.
 Micrograph of fly ash from circulation fluidized bed combustion



Rys. 7. SEM. 500×.
Mikrofotografia popiołu
lotnego z kotła
konwencjonalnego
Fig. 7. SEM. 500×.
Micrograph of fly ash
from conventional furnace

7. ANALIZA PRZYDATNOŚCI I WNIOSKI

Opierając się na informacjach zawartych w normie PN-EN 124:2000 należy przyjąć, że beton zbrojony wykorzystywany w omawianej prefabrykacji narażony będzie na działanie środków odladzających, działanie mrozu i będzie na przemian suchy lub nawilżony (karbonatyzacja), powinien być również odporny na ścieranie. Studzienki kablowe, w przeciwieństwie do studzienek kanalizacyjnych, nie są narażone w większym stopniu niż inne elementy betonowe na korozję siarczanową.

Zwieńczenia wpustów ściekowych oraz włazy kanałowe, w zależności od miejsca ich zabudowy, zostały podzielone w omawianej normie na sześć klas, które w miarę narastania przewidywanego obciążenia oznaczono kolejnymi literami alfabetu i symbolami cyfrowymi, od A 15 – powierzchnie przeznaczone wyłącznie dla pieszych i rowerzystów, poprzez B 125, C 250, D 400, E 600, do F 900 – powierzchnie poddane szczególnie dużym naciskom.

Odnosnie betonu, jaki powinien być użyty do wykonania omawianych prefabrykatów, wspomniana norma stwierdza, że wytrzymałość na ściskanie betonu powinna być następująca:

- dla klas wyrobów B 125 ÷ F 900 – co najmniej 45 MPa
dla próbek sześciennych
o długości krawędzi 150 mm
lub 40 MPa
dla próbek walcowych
o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm,
- dla włazów kanałowych klasy A 15 – co najmniej 25 MPa.

Grubość otuliny betonowej pokrywającej zbrojenie powinna wynosić nie mniej niż 20 mm z każdej strony, zaś konstrukcja zbrojona oraz jej elementy powinny spełniać wymagania odpowiednich norm europejskich. Norma podkreśla, że w przypadku, gdy omawiane elementy prefabrykowane stanowią kombinację metalu i betonu, konieczne jest zapewnienie właściwej przyczepności między tymi materiałami, zaznaczając, że w przypadku wykonanych z żelbetu włazów klasy A 15 do D 400 krawędzie i powierzchnie styku korpusu i pokrywy powinny być zabezpieczone żeliwem lub stalą cynkowaną na gorąco.

Pokrywy i zwieńczenia studzienek kanalizacji kablowych, jak już wspomniano, narażone będą na działanie mrozu, środków odladzających (NaCl i CaCl_2) oraz w umiarkowanym stopniu na ścieranie. Klasy ekspozycji betonu można zatem określić jako XC4, XF4 oraz XM1. Krajowe uzupełnienia normy PN-EN 206-1:2003 wskazują rodzaje cementów zalecanych do stosowania dla betonów o określonych klasach ekspozycji. W tabelicy 9 zestawiono zakresy przydatności cementów, które są lub prawdopodobnie będą produkowane w Polsce, do betonów w klasach ekspozycji XC4, XF4 oraz XM1.

W oparciu o informacje i zalecenia norm PN-EN 124 oraz PN-B-06265 należy przyjąć, że omawiane wyroby powinny być wykonywane z betonu klasy C40/50 lub wyższej, na kruszywie żwirowym, zbrojone prętami stalowymi. Wyjątek mogą stanowić wyroby klasy A 15, do produkcji których może zostać użyty beton klasy C25/30. Wyroby powinny być formowane z mieszanki gęstoplastycznej lub plastycznej, o współczynniku $w/c \leq 0,45$, zagęszczanej na stołach wibracyjnych. Wytrzymałość wczesna betonów nie odgrywa istotnej roli, gdyż uformowany beton pozostaje w tzw. oprawach pokryw, które wykonane są ze stali lub żeliwa.

Rozważając z kolei dobór cementu do wykonania omawianych betonów i biorąc przy pod uwagę zalecenia normy PN-EN 206-1, poza cementami portlandzkimi CEM I, należy wziąć pod uwagę następujące cementy powszechnego użytku:

- CEM II/A-S,
- CEM II/B-S,
- CEM II/A-LL,
- CEM II/A-M(S-LL),
- CEM III/A,
- CEM III/B.

Decydującą rolę w doborze cementu powinna odegrać troska o trwałość produkowanych wyrobów. Ważne są również koszty wytwarzania omawianych wyrobów, a zapewne także chęć realizacji przez potencjalnego producenta zasad zrównoważonego rozwoju, które w tym przypadku należy rozumieć między innymi jako dążenie do zastosowania betonu zawierającego cement, który został wyprodukowany przy jak najmniejszej emisji dwutlenku węgla do atmosfery, a więc cement zawierający stosunkowo mało klinkieru portlandzkiego [33]. Nie wszystkie wymienione przesłanki decyzyjne są zbieżne, część z nich jest przeciwstawna. Za priorytet należy

uznać zapewnienie odpowiedniej trwałości wyrobów, która w znacznym stopniu uzależniona będzie od zapewnienia właściwej ochrony stali zbrojeniowej w betonie. Z tych też względów wybór cementów należy ograniczyć do wymienionych wyżej, a wytworzone z ich udziałem betony dostatecznie długo i starannie pielęgnować i maksymalnie, jak tylko to jest możliwe, wydłużyć okres czasu, jaki powinien upłynąć od ich wytworzenia do poddania gotowego wyrobu działaniu mrozu i środków odładzających (nie krócej niż trzy miesiące).

Tablica 9. Zakresy przydatności cementów powszechnego użytku do produkcji betonów w klasach ekspozycji XC4, XF4 oraz XM1, zgodnie z PN-B-06265

Table 9. Applicability limits of common cements in the production of concretes exposed to the standard XC4, XF4 and XM1 environment, according to PN-B-06265

Nazwa cementu	Oznaczenie cementu	Klasy ekspozycji betonu		
		XC4	XF4	XM1
Cement portlandzki	CEM I	+	+	+
Cement portlandzki żuźlowy	CEM II/A-S	+	+	+
	CEM II/B-S	+	+	+
Cement portlandzki popiołowy	CEM II/A-V	+	o	+
	CEM II/B-V	+	o	+
Cement portlandzki wapienny	CEM II/A-LL	+	+	+
	CEM II/B-LL	o	o	o
Cement portlandzki wieloskładnikowy	CEM II/A-M(S-V)	+	o	+
	CEM II/B-M(S-V)	+	o	+
	CEM II/A-M(S-LL)	+	+	+
	CEM II/B-M(S-LL)	o	o	o
	CEM II/A-M(V-LL)	+	o	+
	CEM II/B-M(V-LL)	o	o	o
Cement hutniczy	CEM III/A	+	+	+
	CEM III/B	+	+	+
	CEM III/C	o	o	o
Cement wieloskładnikowy	CEM V/A	o	o	o
	CEM V/B	o	o	o

Oznaczenia:
+ akceptowany zakres stosowania, o – nie należy stosować

Przedstawione rozważania stanowią przykład problemów, z którymi producenci betonów spotykają się w swej codziennej praktyce, a które będą się nasilać wraz z postępującymi zmianami na rynku cementowym. Wzrost udziału cementów CEM II – CEM V w ogólnej masie cementów powszechnego użytku wymaga wiedzy o tych cementach i posiadania niezbędnych informacji o innych składnikach spoiw niż klinkier portlandzki. Wszystkie omawiane w pracy materiały biorą aktywny udział w procesach kształtowania cech użytkowych betonów. Poza szeregiem podobieństw, wykazują jednak wiele różnic. Umiejętne wykorzystanie wiedzy o ich właściwościach może w wielu przypadkach zadecydować o sukcesie zamierzenia realizowanego z ich udziałem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Chładziński S., Garbacik A.*: Cementy wieloskładnikowe w budownictwie. Wyd. Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2008
- [2] *Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J.*: Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji. Wyd. Górażdże Cement, HEIDELBERGCEMENT Group, Opole 2002
- [3] *Müller Ch.*: Techniczne i środowiskowe aspekty stosowania cementów mieszanych w betonach. *Drogi i Mosty*, nr 2/2003, 5 - 32
- [4] Stowarzyszenie Producentów Cementu: Informator 2008
- [5] *Brylicki W., Gawlicki M., Małolepszy J.*: Nowe możliwości wykorzystania żużli hutniczych i odlewniczych w przemyśle materiałów budowlanych. *Zeszyty Naukowe AGH, Ceramika*, zeszyt 52, 1989, 261 - 270
- [6] *Garbacik A., Baran T.*: Wpływ dodatku popiołu lotnego krzemionkowego z różną zawartością części palnych na właściwości cementu. *Budownictwo-Technologie-Architektura* nr 4/2008, 62 - 65
- [7] *Wiadomości PKN. Normalizacja*, nr 4, 2008, 3
- [8] *Gawlicki M., Roszczyniański W.*: Nowe elementy w gospodarce odpadami energetycznymi. *Materiały Szkoły Gospodarki Odpadami*, AGH-PAN-UTEX, Ryto, 18 - 22 września 2000, 91 - 100
- [9] *Scrivener K.*: NANOCEM. What is it? Achievements so far? What next? *Mat. konf. 4th Open Meeting of the NANOCEM CONSORTIUM. Role of Nano and Micro Processes in the Performance of Cement and Concrete*, Prague, 22nd April, 2008
- [10] *Peukert S.*: Cementy powszechnego użytku i specjalne. Wyd. Polski Cement, Kraków 2000
- [11] *Deja J.*: Trwałość zapraw i betonów żuźlowo-alkalicznych. *Prace Komisji Nauk Ceramicznych PAN, Ceramika*, 83, 2004

- [12] *Owsiak Z.*: Wewnętrzna korozja siarczanowa betonu. Monografie, studia , rozprawy M6, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2008
- [13] *Miller F.M., Conway T.*: Use of ground granulated blast furnace slag for reduction of expansion due to delayed ettringite formation. *Cement, Concrete and Aggregates*, 25(2), 2003, 59 - 68
- [14] *Flis I., Wąż S.*: Trwałość mrozowa betonów wykonanych na cementach z dodatkiem granulowanego żużla wielkopiecowego. *Mat. konf. Dni betonu - tradycja i nowoczesność. Wisła, 13 - 15 październik 2008*, 233-243
- [15] *Giergiczny Z., Pużak T.*: Popiół fluidalny a właściwości mieszanki betonowej. *Mat. konf. Dni betonu - tradycja i nowoczesność. Wisła, 13 - 15 październik 2008*, 971 - 980.
- [16] *Bentz D.P.*: Modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D. *Cement & Concrete Composites*, 28, 2006, 124 - 129
- [17] *Bonavetti V.L., Rahhal V.F., Irassar E.F.*: Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 2001, 853 - 859
- [18] *Lewis R., Sear L., Wainwright P., Ryle R.*: Cementitious additions. w: Newman J., Choo B.S. (eds): *Advanced Concrete Technology. Constituent Materials*. Wyd. Elsevier, Oxford, 2003, 3/58 - 3/59
- [19] *Cochet G., Sorrentino F.*: Limestone filled cements: Properties and uses. w: Sarkar S.L., Ghosh S.N.(red.): *Mineral admixtures in cement and concrete, vol.4*. Wyd. Academia Books International, New Delhi, 1995, 266 - 295
- [20] *Baron J., Douvre C.*: Technical and economical aspects of the use of limestone filler additions in cement. *World Cement*, 18, 1987, 100 - 104
- [21] *Czarnecki L.*(red.): *Beton według normy PN-EN 206-1 - komentarz*. Wyd. Polski Cement, Kraków, 2005
- [22] *Giergiczny Z.*: Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych. *Inżynieria Lądowa, Monografia 325*, Politechnika Krakowska, Kraków 2006
- [23] *Khayat K.H., Aitcin P-C.*: Silica fume - a unique supplementary cementitious material. Rozdział w: Ghosh S.N. (ed.), *Progress in cement and concrete. Mineral admixtures in cement and concrete*, Academia Books International, New Delhi, 1995, Vol. 4, 226 - 265
- [24] *Jasiczak J., Mikołajczyk P.*: *Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997
- [25] *Nocun-Wczelik W.*: *Pył krzemionkowy - właściwości i zastosowanie w betonie*. Wyd. Polski Cement, Kraków 2005
- [26] *Sellevold E.J., Radjy F.F.*: Condensed silica fume (microsilica) in concrete: water demand and strength development. Rozdział w: *The use of fly ash, silica fume, slag, and other mineral by-products in concrete*. Ed. Malhotra V.M., ACI SP-79, 677 - 694, Detroit, Michigan 1983

- [27] *Giergiczny E., Góralna K.*: Mielony granulowany żużel wielkopiecowy - dodatek do betonu typu II. *Budownictwo-Technologie-Architektura*, 1(41), 2008, 56 - 59
- [28] *Glinicki M.A., Zieliński M.*: Air void system in concrete containing circulating fluidized bed combustion fly ash. *Materials and Structures*, 41, 2008, 681 - 687
- [29] *Glinicki M.A., Nowowiejski G.*: Długotrwała wytrzymałość betonu z dodatkiem popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych. *Mat. konf. Dni Betonu - tradycja i nowoczesność. Wisła, 13-15 październik 2008*, 981 - 992
- [30] *Jueshi Q., Caijun S., Zhi W.*: Activation of blended cements containing fly ash. *Cement and Concrete Research*, 31(8), 2002, 1121 - 1127
- [31] *Gawlicki M., Roszczyniański W.*: Zmiany w technikach spalania paliw i odsiarczania a wykorzystanie odpadów elektrownianych w przemyśle materiałów wiążących. *Ceramika*, Vol. 66/1, 2001, 39 3- 401
- [32] *Chandra S* (ed.): *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing*. Noyes Publications, USA, New Jersey, Westwood 1997, 53 - 141
- [33] *Rosković R., Bjegović D.*: Role of mineral additions in reducing CO₂ emission. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 2005, 974 - 978

WYKAZ POWOŁANYCH NORM

- PN-EN 197-1:2002. Cement. Część 1: Skład wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- PN-EN 206-1:2003. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- PN-EN 124:2000. Zwieńczenia wpustów i studzienek kanalizacyjnych do nawierzchni dla ruchu pieszego i kołowego. Zasady konstrukcji, badania typu, znakowanie, sterowanie jakością
- PN-B-19707:2003. Cement. Cement specjalny. Skład wymagania i kryteria zgodności
- PN-EN 197-1:2002/A3:2007. Zmiana do Polskiej Normy PN-EN 197-1:2002. Cement. Część 1: Skład wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku (wycofana bez zastąpienia w lutym 2008 roku)
- PN-EN 450-1+A1:2009. Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- PN-EN 13263:2006. Pył krzemionkowy do betonu. Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności
- PN-EN 15167-1:2006. Mielony granulowany żużel wielkopiecowy do stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie. Część 1: Definicje, specyfikacja i kryteria zgodności
- PN-B-06265:2004. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206-1. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- PN-B-06265:2004. Krajowe uzupełnienia normy PN-EN 206-1:2003. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność

INFORMACJE DODATKOWE

Artykuł opracowano w ramach Projektu Badawczego - Rozwojowego N R04 0007 04, finansowanego ze środków budżetowych na naukę w latach 2008 - 2009.

APPLICABILITY OF BLENDED CEMENTS AND MINERAL ADDITIVES IN THE PRODUCTION OF CONCRETE MIX FOR PRECAST MANHOLE COVERS**Abstract**

An attempt to systematize the data relating to the components of cements produced in Poland, as well as to the type II concrete standard additives was done. Simultaneously, the conventional fly ash and fluidized bed fly ash (CAFBC) were discussed in terms of their potential use in the production of concrete mix for precast manhole covers.

