

# Racjonalne wykorzystanie popiołu lotnego w betonie

## Wprowadzenie

Norma PN-EN 206-1 [1] racjonalizuje możliwości wprowadzenia do betonu szeregu dodatków mineralnych, które mogą w znaczący sposób wpływać zarówno na właściwości mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu. Zgodnie z zapisami normy przez dodatek należy rozumieć drobnoziarnisty składnik wprowadzany do składu betonu w celu poprawy pewnych właściwości użytkowych lub uzyskania specjalnych właściwości.

Norma [1] wyszczególnia dwa typy dodatków nieorganicznych:

- dodatki prawie obojętne (typ I), a więc substancje inertne lub niemal inertne w środowisku hydratyzującego cementu
- dodatki o właściwościach pucolanowych lub utajonych właściwościach hydraulicznych (typ II); a więc substancje aktywne w środowisku zaczynu cementowego, spośród których wymienić należy przede wszystkim popioły lotne, pyły krzemionkowe oraz żużle wielkopiecowe.

Zawartość dodatków typu I i typu II w składzie betonu należy ustalać na podstawie badań wstępnych (załącznik A do normy PN-EN 206-1). Norma zaleca określenie wpływu dodatków nie tylko na wytrzymałość betonu, ale również na szereg innych właściwości, zwłaszcza takich, jak dynamika narastania wytrzymałości betonu, skurcz oraz szeroko rozumiana trwałość betonów. Jest to bez wątpienia słuszne, szczególnie w Polsce, gdzie dosyć rzadko wykonywane są badania pełne, a zwłaszcza trwałościowe (badania długoterminowe, mrozoodporność, oznaczenia odporności na agresję chemiczną).

Dodatki typu II o ustalonej przydatności mogą być uwzględniane w projektowaniu składu betonu w ramach określenia zawartości cementu w betonie oraz współczynnika woda/cement. Następuje to poprzez wprowadzenie określonej wartości współczynnika „k”.

Pojęcie współczynnika „k” umożliwia:

- zastąpienie terminu „współczynnik woda/cement”

terminem „współczynnik woda/(cement + k x dodatek)”

- ustalenie minimalnej zawartości cementu dla danej klasy ekspozycji.

Dodatkiem, który jest najczęściej wprowadzany do betonów, jest popiół lotny z węgla kamiennego, jemu też poświęca się zazwyczaj największą uwagę.

W prezentowanej pracy podano zasady postępowania przy stosowaniu popiołów lotnych jako dodatku mineralnego wprowadzanego do betonu w warunkach podanych w normie PN-EN 206-1 [1]. Omówiono jakość popiołów lotnych oraz wpływ dodatku popiołów lotnych na właściwości świeżego i stwardniałego betonu.

## Wymagania jakościowe stawiane popiołowi lotnemu stosowanemu jako dodatek do betonu

Popiół stosowany jako dodatek mineralny typu II do betonu musi spełniać wymagania zawarte w normie PN-EN 450 [2]. Należy zauważyć, że norma PN-EN 450 [2] definiuje popiół lotny jako: „Drobno uziarniony pył, składający się głównie z kulistych, zeszkliwionych ziaren, otrzymany przy spalaniu pyłu węglowego, mający właściwości pucolanowe, zawierający w swoim składzie przede wszystkim SiO<sub>2</sub> i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, przy czym zawartość reaktywnego SiO<sub>2</sub>, określona i oznaczona jak podano w EN 197-1, wynosi co najmniej 25% masy”. Uzupełnieniem powyższej definicji jest stwierdzenie, że „popiół lotny jest otrzymywany w wyniku elektrostatycznego lub mechanicznego wytrącania cząsteczek pyłu z gazów odlotowych kotłowni opalanych pyłem antracytu lub węgla kamiennego” oraz uwaga, w której zaznaczono, że w oparciu o przepisy krajowe do betonów mogą być również wprowadzane popioły lotne otrzymywane w wyniku spalania węgla brunatnego, w których całkowita zawartość CaO nie przekracza 10% masy popiołu, pod warunkiem, że spełniają one wszystkie inne wymagania PN-EN 450.

Szczegółowe wymagania dotyczące właściwości chemicznych i fizycznych popiołu lotnego zawarto w tabelach 1 i 2, zaś częstotliwość wykonywania tych oznaczeń podano w tabeli 3.

Tabela 1. Wymagania dla popiołów lotnych wg PN-EN 450 – skład chemiczny.

Składnik	Zawartość w popiele, % mas.
Straty prażenia	max 5,0% <sup>1)</sup>
Chlorki	max 0,10%
SO <sub>3</sub>	max 3,0%
CaO <sub>wolny</sub>	max 1,0% <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Przepisy krajowe mogą dopuszczać stosowanie popiołu lotnego o stratach prażenia do 7% masy.  
<sup>2)</sup> Popiół lotny, w którym zawartość wolnego CaO jest większa niż 1,0% masy, lecz nie większa niż 2,5%, może być również akceptowany pod warunkiem zachowania stałości objętości – próba Le Chateliera max 10 mm

Tabela 2. Wymagania dla popiołów lotnych wg PN-EN 450 – właściwości fizyczne.

Właściwość		Wymagania
Miatkość, pozostatość na sicie o oczkach 0,045 mm przy przesiewaniu na mokro wg EN 451-2		max. 40% masy
Wskaźnik aktywności pucolanowej	po 28 dniach	min. 75%
	po 90 dniach	min. 85%
Staość objętości Badanie jest konieczne, gdy zawartość CaO <sub>wolny</sub> > 1,0% masy		max. 10 mm
Gęstość objętościowa		max. ± 150 kg/m <sup>3</sup> różnicy w stosunku do wartości średniej podanej przez producenta

Tabela 3. Częstotliwość poboru próbek popiołu i badań według PN-EN 450

Właściwość	Częstotliwość poboru próbek
Straty prażenia	codziennie
Miałość (uziarnienie)	codziennie
Wolny tlenek wapnia – CaO <sub>wolny</sub>	raz w tygodniu
Chlorki	raz w miesiącu
Bezwodnik kwasu siarkowego SO <sub>3</sub>	raz w miesiącu
Gęstość pozorna	raz w miesiącu
Wskaźnik aktywności pucolanowej	dwa razy w miesiącu
Statość objętości	raz w tygodniu, jeżeli oznaczenie jest wymagane

Należy podkreślić, że w definicji popiołów lotnych podanej w normie PN-EN 450 nie mieszczą się popioły otrzymywane w wyniku spalania węgla w kotłach fluidalnych. Ten rodzaj popiołu lotnego oraz popioły otrzymane w trakcie procesów suchego lub półsuchego odsiarczania spalin (przykłady składów chemicznych popiołów podano w tabeli 4) nie spełniają wymagań jakościowych stawianych popiołom lotnym do betonu podanych w tabelach 1 i 2.

Spalanie w kotłach fluidalnych jest zazwyczaj zintegrowane z odsiarczaniem. Oba procesy przebiegają w temperaturze około 850°C. Popioły powstające w takich warunkach stanowią mieszaninę popiołu paliwa o silnie zaznaczonych właściwościach pucolanowych, nie zawierającego jednak fazy szklistej i ziaren o owalnych kształtach, produktu odsiarczania – anhydrytu, zdekarbonatyzowanego sorbentu – aktywnego CaO, a także pewnej ilości wtórnego CaCO<sub>3</sub>. Odsiarczanie spalin w kotłach konwencjonalnych, niezależnie od metody, jaką jest prowadzone, pozostaje bez wpływu na jakość popiołów lotnych jedynie wtedy, gdy poddawane są mu odpylone gazy odlotowe. W pozostałych przypadkach, materiał wytracony w urządzeniach odpylających stanowi mieszaninę, której głównymi składnikami są: popiół paliwa, produkty odsiarczania – siarczany (VI) i siarczany (IV) wapnia, sorbent – CaCO<sub>3</sub> oraz tlenek wapnia [3]. Tego rodzaju produkt uboczny, często nazywany również popiołem lotnym, nie może być użyty jako dodatek do betonów odpowiadający wymaganiom normy PN-EN 450.

Na fot. 1 przedstawiono zdjęcia popiołów lotnych z kotłów konwencjonalnych i kotłów fluidalnych uzyskane w wyniku badań przeprowadzonych na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM).

#### Wykorzystanie popiołu lotnego do produkcji betonu zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 206-1

Popiół lotny spełniający wymagania normy PN-EN 450, jak już wspomniano, może być stosowany do wytwarzania betonów zgodnie z zapisami normy PN-EN 206-1:2000 jako dodatek typu II. Maksymalna zawartość popiołu lotnego w betonie, uwzględniona w wartości współczynnika „k”, powinna spełniać warunek:

$$\text{popiół lotny/cement} \leq 0,33 \text{ masowo}$$

W przypadku wprowadzenia do betonu większych ilości popiołu lotnego, jego nadmiaru nie należy uwzględniać przy obliczaniu współczynnika woda/(cement + k × popiół lotny) oraz przy określaniu minimalnej zawartości cementu w betonie.

Dla betonów zawierających cementy CEM I, spełniające wymagania PN-EN 197-1 dopuszcza się stosowanie następujących wartości współczynnika „k”:

- dla cementu CEM I 32,5 – k = 0,2
  - dla cementów CEM I 42,5 i CEM I 52,5 – k = 0,4.
- Krajowe uzupełnienie PN-EN 206-1 zawarte w normie PN-B-06265 [4] dopuszcza rozszerzenie podanych wyżej uwarunkowań także na cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A z wyłączeniem cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/A-V. Minimalna zawartość cementu w betonie, wymagana w odpowiedniej klasie ekspozycji betonu może być zmniejszona maksymalnie o ilość równą:

$$k \times (\text{minimalna zawartość cementu w danej klasie ekspozycji} - 200) \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Należy zaznaczyć, że ilość spoiwa (cement + popiół) w betonie nie powinna być mniejsza niż minimalna zawartość cementu wymagana dla danej klasy ekspozycji.

Minimalne zawartości cementu, przy stosowaniu popiołu lotnego, dla betonów w poszczególnych klasach ekspozycji podano w tabeli 5 [4]. Mniejsze od dopuszczalnych możliwości redukcji cementu lub brak możliwości zastosowania popiołu lotnego w miejsce cementu w wybranych klasach ekspozycji (XF2 – XF4) wynikają z wieloletnich doświadczeń stosowania popiołu lotnego, co znalazło swoje potwierdzenie w normach wielu krajów o klimacie zbliżonym do klimatu polskiego, np. Niemczech i Austrii.

Poniżej podano dwa przykłady dokonywania korekt receptur betonu przy stosowaniu popiołu lotnego, z uwzględnieniem zasad podanych w normie PN-B 206-1. Oczywiście można stosować również inne sposoby korekty receptur, choćby metodę podaną w książce „Beton według PN-B 206-1” wydanej pod redakcją prof. L. Czarnieckiego [5].

#### PRZYKŁAD I

Jak należy przeprojektować recepturę betonu zawierającego cement portlandzki CEM I 32,5R na beton zawierający w swoim składzie maksymalną zawartość popiołu, spełniając wymagania normy PN-EN 206-1? Beton przeznaczony jest do wykonania obiektu narażonego na słabe oddziaływanie środowiska agresywnego chemicznie (klasa ekspozycji XA<sub>1</sub>).

Receptura wyjściowa:

Cement portlandzki CEM I 32,5R – 350 kg/m<sup>3</sup>

Piasek 0 ÷ 2,0 mm – 594 kg/m<sup>3</sup> [32,5% masy kruszywa]

Żwir 2,0 ÷ 8,0 mm – 547 kg/m<sup>3</sup> [30,0% masy kruszywa]

Żwir 8,0 ÷ 16,0 mm – 683 kg/m<sup>3</sup> [37,5% masy kruszywa]

Woda – 175 kg/m<sup>3</sup>

Współczynnik w/c = 0,5

Gęstość cementu g = 3,1 kg/dm<sup>3</sup>

Objętość wprowadzonego spoiwa V = 350/3,1 = 112,9 dm<sup>3</sup>.

Proces przeprojektowywania:

CEM I 32,5R ⇒ k = 0,2

1. Maksymalna zawartość popiołu

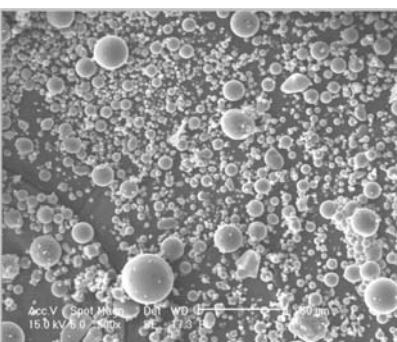
popiół lotny (p)/cement (c) ≤ 0,33 masowo

p = 0,33 × c

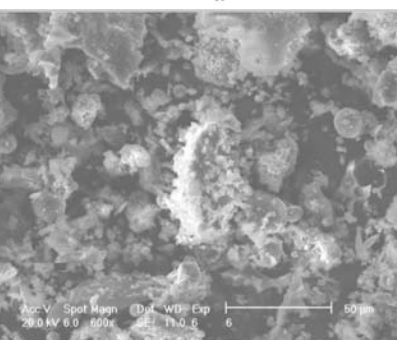
Zakładamy taką samą wodozgodność mieszanki betonowej z dodatkiem popiołu lotnego:

w/c = w(c + k × p)

Fot. 1. Zdjęcia mikroskopowe SEM popiołów lotnych: a – krzemionkowy popiół lotny z konwencjonalnego kotła pyłowego, b – popiół z kotła fluidalnego



a



b

$0,5 = 175(c + 0,2 \times 0,33 \times c)$   
 Ilość cementu = 328,0 kg  
 Ilość popiołu p =  $0,33 \times c = 0,33 \times 328 = 108$  kg  
 Obliczamy objętość spoiwa w betonie:  
 Gęstość popiołu lotnego  $g_p = 2,2$  kg/dm<sup>3</sup>  
 $V = 328/3,1 + 108/2,2 = 155$  dm<sup>3</sup> > 112,9 dm<sup>3</sup>  
 (objętość cementu w recepturze wyjściowej)  
 Ponieważ objętość części spoiwowej mieszanki z dodatkiem popiołu jest większa o 42,1 dm<sup>3</sup> (155 – 112,9 = 42,1), musimy o taką objętość zmniejszyć ilość kruszywa:

- objętość kruszywa w mieszance wyjściowej 1821 kg (p. 594 kg + ż. 547 + ż. 683) / 2,65 kg/dm<sup>3</sup> = 688 dm<sup>3</sup> (gęstość piasku i żwiru ÷ 2,65 kg/dm<sup>3</sup>)
- objętość kruszywa w mieszance betonowej z popiołem lotnym 688 – 42,1 = 645,9 dm<sup>3</sup>, co daje ilość 645,9 × 2,65 = 1712 kg

Znając procentowe udziały poszczególnych rodzajów kruszywa możemy ustalić ostateczny skład receptury z dodatkiem popiołu lotnego.

Uwaga: niektórzy praktycy zmniejszają tylko ilość kruszywa drobnego (piasku), natomiast zawartość kruszywa grubego (>2,0 mm) pozostawiają bez zmian.

Skład receptury przeprojektowanej:

Cement portlandzki CEM I 32,5R – 328 kg/m<sup>3</sup>

Popiół lotny – 108 kg/m<sup>3</sup>

Piasek 0 ÷ 2,0 mm – 557 kg/m<sup>3</sup>

Żwir 2,0 ÷ 8,0 mm – 514 kg/m<sup>3</sup>

Żwir 8,0 ÷ 16,0 mm – 641 kg/m<sup>3</sup>

Woda – 175 kg/m<sup>3</sup>

Współczynnik w/c = 0,5

#### PRZYKŁAD II

Należy przeprojektować recepturę betonu zawierającego cement portlandzki CEM I 42,5R na beton zawierający w swoim składzie maksymalną zawartość popiołu i spełniający wymagania normy PN-EN 206-1. Beton przeznaczony jest do wykonania obiektu narażonego na słabe oddziaływanie środowiska agresywnego chemicznie (klasa ekspozycji XA<sub>1</sub>).

Receptura wyjściowa:

Cement portlandzki CEM I 42,5R – 350 kg/m<sup>3</sup>

Piasek 0 ÷ 2,0 mm – 594 kg/m<sup>3</sup>

Żwir 2,0 ÷ 8,0 mm – 547 kg/m<sup>3</sup>

Żwir 8,0 ÷ 16,0 mm – 683 kg/m<sup>3</sup>

Woda – 175 kg/m<sup>3</sup>

Współczynnik w/c = 0,5

Gęstość cementu  $g = 3,1$  kg/dm<sup>3</sup>

Objętość wprowadzonego spoiwa  $V = 350/3,1 = 112,9$  dm<sup>3</sup>.

Proces przeprojektowywania:

CEM I 42,5R ⇒  $k = 0,4$

2. Maksymalna zawartość popiołu

popiół lotny (p)/cement (c) ≤ 0,33 masowo

$p = 0,33 \times c$

Zakładamy taką samą wodożądność mieszanki betonowej:

$w/c = w(c + k \times p)$

$0,5 = 175(c + 0,4 \times 0,33 \times c)$

Ilość cementu = 309,0 kg

Ilość popiołu  $p = 0,33 \times c = 0,33 \times 309 = 102$  kg.

Obliczamy objętość spoiwa w betonie:

Gęstość popiołu lotnego  $g_p = 2,2$  kg/dm<sup>3</sup>

$V = 309/3,1 + 102/2,2 = 146$  dm<sup>3</sup> > 112,9 dm<sup>3</sup>

(objętość cementu w recepturze wyjściowej).

Ponieważ objętość części spoiwowej mieszanki

Składnik	Skład chemiczny wybranych krajowych popiołów lotnych, % wag.			
	Popioły lotne z kotłów konwencjonalnych			Popiół z kotła fluidalnego
	Popiół krzemiany z węgla kamiennego	Popiół wapniowy z węgla brunatnego	Popiół z suchego odsiarczenia	
SiO <sub>2</sub>	52,0	42,8	41,9	33,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,0	17,5	21,5	17,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,0	4,4	7,6	6,7
CaO <sub>całkowity</sub>	6,0	23,4	19,3	18,7
CaO <sub>wolny</sub>	1,0	4,1	6,8	4,8
MgO	2,5	0,9	1,4	3,1
SO <sub>3</sub>	1,0	4,3	2,4	9,0
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	2,9	0,3	3,2	2,8

ki z dodatkiem popiołu jest większa o 33,1 dm<sup>3</sup> (146 – 112,9 = 33,1), to musimy o taką objętość zmniejszyć ilość kruszywa:

- objętość kruszywa w mieszance wyjściowej 1821 kg (p. 594 kg + ż. 547 + ż. 683) / 2,65 kg/dm<sup>3</sup> = 688 dm<sup>3</sup> (gęstość piasku i żwiru ÷ 2,65 kg/dm<sup>3</sup>)
- objętość kruszywa w mieszance betonowej z popiołem lotnym 688 – 33,1 = 654,9 dm<sup>3</sup>, co daje ilość 654,9 × 2,65 = 1735 kg

Znając procentowe udziały poszczególnych rodzajów kruszywa możemy ustalić ostateczny skład receptury z dodatkiem popiołu lotnego.

Skład receptury przeprojektowanej

Cement portlandzki CEM I 42,5R – 309 kg/m<sup>3</sup>

Popiół lotny – 102 kg/m<sup>3</sup>

Piasek 0 ÷ 2,0 mm – 564 kg/m<sup>3</sup>

Żwir 2,0 ÷ 8,0 mm – 521 kg/m<sup>3</sup>

Żwir 8,0 ÷ 16,0 mm – 650 kg/m<sup>3</sup>

Woda – 175 kg/m<sup>3</sup>

Współczynnik w/c = 0,5

W tabeli 6 przedstawiono porównanie składu receptur betonów.

Należy podkreślić, że wszelkie metody ustalania składu betonu mają jedynie charakter pomocniczy i wymagają sprawdzenia laboratoryjnego w procedurze badań wstępnych omówionych w załączniku A (normatywny) do normy PN-EN 206-1.

#### Uwagi praktyczne

Popioły lotne stosowane są w betonach nie tylko jako zamiennik części cementu, ale również jako drobna frakcja kruszywa – mikrokruszywo. Wykorzystanie popiołów jako mikrokruszywa (bez redukcji ilości cementu) jest szczególnie zalecane w przypadku używania piasków „grubych”, uzyskuje się wówczas bardziej szczelny stos kruszywowy i zapobiega się wydzielaniu wody z betonu. Podstawowe zmiany, jakie wprowadza popiół lotny w świeżej mieszance betonowej związane są z jej wodożądnością i urabialnością. Dodatek popiołu lotnego, w zależności od jego właściwości oraz składu chemicznego i fazowego, może zmniejszyć lub zwiększyć ilość wody zarobowej w mieszance betonowej. Zależy to przede wszystkim od uziarnienia (miałkości) popiołu lotnego oraz ilości, w jakiej jest wprowadzony do betonu. Bardzo drobne popioły lotne zmniejszają ilość wody potrzebnej do uzyskania pożądanej konsystencji, natomiast popioły gruboziarniste, zawierające znaczne ilości niespalonego węgla, a więc ziarna o silnie rozwiniętej powierzchni właściwej, powodują zazwyczaj zwiększenie ilości wody zarobowej (tabela 7). Wprowa-

Tabela 4. Przykłady składów chemicznych popiołów lotnych

Tabela 5 – Zalecane wartości graniczne składu oraz właściwości betonu

Klasy ekspozycji																						
Brak zagrożenia agresją środowiska lub zagrożenia korozją	Korozyja spowodowana karbonatyzacją						Woda morska			Chlorki niepochozące z wody morskiej			Zamrażanie/rozmarzanie				Środowiska chemicznie agresywne			Agresja wywołana ścieraniem <sup>a)</sup>		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3		
Maksymalne w/c	0,65	0,60	0,60	0,50	0,50	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,55	0,55	0,55	0,45		
Minimalna klasa wytrzymałości	C 16/20	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 30/37	C 30/37	C 25/30	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 35/45		
Minimalna zawartość cementu (kg/m <sup>3</sup> )	260	280	280	300	300	320	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360	300	300	300	320		
Minimalna ilość CEM 32,5 przy k=0,2 (kg/m <sup>3</sup> )	250	260	260	280	280	300	280	280	300	280	b)	b)	b)	280	300	330	280	280	280	300		
Minimalna ilość CEM 42,5 przy k=0,4 (kg/m <sup>3</sup> )	240	250	250	270	270	270	270	270	270	270	270	b)	b)	260	270	300	260	260	260	280		
Minimalna zawartość powietrza (%)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,0 <sup>c)</sup>	4,0 <sup>c)</sup>	4,0 <sup>c)</sup>	4,0 <sup>c)</sup>	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
Inne wymagania	Kruszywo zgodne z PN-EN 12620 o odpowiedniej odporności na zamrażanie/rozmarzanie										Cement odporny na siarczany <sup>d)</sup>			Kruszywo o dużej odporności na ścieranie <sup>e)</sup>			Pielęgnacja powierzchni betonu <sup>e)</sup>					

a) Zaleca się stosowanie kruszywo o uziarnieniu do 4 mm, składających się głównie z kwarcu lub materiałów co najmniej tej samej twardości; frakcje grubsze – ze skał magmowych czy metamorficznych lub tworzyw sztucznych o dużej odporności na ścieranie. Zaleca się, aby ziarna odznaczały się umiarkowanie chropowatą powierzchnią oraz wypukłym kształtem, a mieszanka była możliwie gruboziarnista. Powierzchnia betonu może być uszlachetniona materiałami odpornymi na ścieranie. W warunkach eksploatacji powierzchni przez wózki na rolkach stalowych lub pojazdy gąsienicowe – dla klas ekspozycji XM2 i XM3 zaleca się stosowanie dodatków ziarnistych opitków stalowych lub granulowanego śrutu żeliwnego, zastępującego za grube frakcje piasku oraz żwiru od 2 mm do 4 mm. Zastępstwo to dotyczy równoważnej objętości kruszywa przez taką samą objętość właściwą tego dodatku w ilości nie większej niż 100 dm<sup>3</sup>.

b) Dopuszcza się stosowanie dodatków typu II do produkcji betonu, lecz nie jako ekwiwalentu części zawartości cementu oraz bez możliwości uwzględnienia tego dodatku przy określaniu w/c.

c) Gdy beton nie jest napowietrzany, zaleca się badanie jego właściwości użytkowych odpowiednią metodą, porównując z betonem, którego odporność na zamrażanie/rozmarzanie w danej klasie ekspozycji jest potwierdzona.

d) W przypadku, gdy zawartość SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> wskazuje na klasy ekspozycji XA2 oraz XA3, stosuje się cement o wysokiej odporności na siarczany HSR zgodny z PN-B-19707.

e) Np. poprzez przótniowanie i wygładzanie betonu.

dzenie do mieszanki betonowej niewłaściwej jakości popiołu lotnego ogranicza skuteczność działania domieszek chemicznych, zwłaszcza plastyfikatorów i superplastyfikatorów. Znaczna ich ilość jest adsorbowana na powierzchniach ziaren węgla (koksiku), co ogranicza efekt uplastyczniający.

Popioły lotne dzięki kulistemu kształtowi ziaren wydatnie poprawiają urabialność mieszanki betonowej, co jest bardzo istotne, zwłaszcza w przypadku betonów pompowalnych. Mieszanka betonowa zawierająca popioły lotne jest spoista i wykazuje mniejsze tendencje do odsączenia wody. Operacje wykańczania betonu z popiołami lotnymi są zazwyczaj łatwiejsze, co procentuje między innymi dłuższą żywotnością pomp i innych urządzeń transportowych.

W przypadku popiołów o niskiej jakości możemy zaobserwować wydzielanie się na powierzchni betonu cząstek niespalonego węgla (koksiku). Ma to wpływ na estetykę powierzchni betonu oraz może utrudnić proces jego utwardzania prowadzony z wykorzystaniem odpowiednich preparatów.

Dodatek popiołu lotnego do betonu, bez równoczesnego zmniejszenia w nim ilości cementu, nie wpływa w sposób istotny na zmianę czasu wiązania, natomiast zastąpienie części cementu popiołem lotnym, opóźnia zazwyczaj początek i koniec wiązania betonu. Wielkość opóźnienia zależy od ilości cementu, zastąpionego przez popiół lotny, całkowitej ilości popiołu wprowadzonego do betonu oraz od właściwości popiołu, zwłaszcza jego aktywności pucolanowej. Przy zastąpieniu części cementu popiołem lotnym następuje obniżenie wytrzymałości na ścislenie betonu we wczesnych okresach twardnienia (do 28 dni). W późniejszych okresach dojrzewania (90 dni i więcej) beton z dodatkiem popiołu lotnego ma wyższe wytrzymałości niż beton nie zawierający popiołu.

Dodatek popiołu lotnego, przy równoczesnym zmniejszeniu ilości cementu w betonie, powoduje zmniejszenie skurczu betonu, które zależy od ilości i jakości użytego popiołu oraz od rodzaju i klasy wytrzymałościowej stosowanego cementu.

Beton, w którym znaczną część cementu zastąpiono popiołem lotnym, może wykazywać ograniczoną odporność na działanie mrozu. Podstawową przyczyną obniżenia mrozoodporności jest powolny przebieg reakcji pucolanowej i mała szybkość przyrostów wytrzymałości betonu. Niedogodność ta zanika we właściwie pielęgnowanych betonach cementowo-popiołowych dojrzewających przez dłuższy okres czasu. Betony te po upływie 60÷90 dni wykazują dobrą mrozoodporność. Najlepszą metodą poprawy mrozoodporności betonu z dodatkiem popiołów lotnych jest zmiana ich mikrostruktury w wyniku za-

Tabela 7. Wodozgodność mieszanin cementowo-popiołowych

Rodzaj spoiwa	Wodozgodność %
Cement CEM I 32,5R	26,1
Cement CEM I 32,5R (80%) + popiół lotny o pozostałości na sicie 0,045 mm – 3,7% (20%)	24,6
Cement CEM I 32,5R (80%) + popiół lotny o pozostałości na sicie 0,045 mm – 40,3% (20%)	25,9

Składnik	Zawartość składnika, kg/m <sup>3</sup> betonu		
	Receptura wyjściowa	Receptura z popiołem k=0,2	Receptura z popiołem k=0,4
Cement	350	328	309
Popiół	---	108	102
Piasek 0-2	594	557	564
Żwir 2-8	547	514	521
Żwir 8-16	683	641	650
Woda	175	175	175

Tabela 6. Skład betonu z dodatkiem popiołu lotnego

stosowania domieszek uplastyczniających, które umożliwiają obniżenie zawartości wody w betonie i uzyskanie niższych wskaźników w/c oraz wprowadzenie do betonu domieszek napowietrzających.

W Europejskim Komitecie Normalizacyjnym trwają prace nad nowelizacją wymagań jakościowych zawartych w normie PN-EN 450, których celem jest opracowanie właściwych kryteriów oceny i określenie możliwości zagospodarowania w procesie wytwarzania betonów popiołów lotnych uzyskanych w wyniku spalania węgla prowadzonego wraz z paliwami alternatywnymi, a także wyróżnienie, w zależności od wielkości strat prażenia i pozostałości na sicie 0,045 mm, różnych klas popiołów lotnych [6]. Wybrane, „przyszłościowe” wymagania dla popiołu lotnego otrzymanego w technologii współspalania węgla i paliw alternatywnych podano w tabeli 8.

dr inż. Zbigniew Giergiczny

Górażdże Cement SA

dr inż. Marek Gawlicki

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

#### Literatura

- 1 PN-EN 206-1:2003 „Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”
- 2 PN-EN 450:1998 „Popiół lotny do betonu. Definicje, wymagania i kontrola jakości”
- 3 Gawlicki M., „Technologie odsiarczania spalin”. Szkoła Gospodarki Odpadami '97. Materiały Szkoły Gospodarki Odpadami, 49-62, Kraków 1997
- 4 PN-B-062265:2004 Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1 Beton - Część 1: „Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”
- 5 „Beton według PN-EN 206-1 – komentarz”. Praca zbiorowa pod redakcją naukową prof. L. Czarnieckiego. Polski Cement 2004
- 6 pr EN 450-1:2003-10. „Fly ash for concrete – Part 1: Definition, specifications and conformity criteria”

Tabela 8. Wybrane, „przyszłościowe” wymagania dla popiołu lotnego otrzymanego w wyniku współspalania węgla i paliw alternatywnych

Oznaczana właściwość	Wymagania	Uwagi
Zawartość Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	≤5,0%	Tylko niewielka ilość alkaliów z popiołu lotnego jest rozpuszczalna
Zawartość MgO	≤4,0%	
Zawartość P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> rozpuszczal	≤100 mg/kg popiołu	Zbyt wysoka zawartość wydłuża początek wiązania i obniża wytrzymałość na ścislenie
Pozostałość na sicie 45 μm:		Wodozgodność zaprawy z popiołem kategorii S (zamiana 25% cementu popiołem) musi wynosić 95% wodozgodności cementu użytego do badań
Straty prażenia:		Kategoria A - popiół najwyższej jakości
• kategoria A	≤5,0%	
• kategoria B	od 2,0 do 7,0%	
• kategoria C	od 4,0 do 9,0%	