

Jacek HALBINIAK
Politechnika Częstochowska

PROJEKTOWANIE SKŁADU BETONÓW Z DODATKIEM POPIOŁÓW LOTNYCH ORAZ ICH WPŁYW NA TEMPO PRZYROSTU WYTRZYMAŁOŚCI

W pracy przedstawiono wyniki badań oceniających wpływ popiołów lotnych na parametry mieszanek betonowych i betonów. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że popioły lotne są wartościowymi dodatkami do kompozytów betonowych. W przypadku zastosowania ich jako częściowego zamiennika cementu powodują spowolnienie tempa przyrostu wytrzymałości betonów w pierwszym etapie ich dojrzewania. Zastosowanie popiołów lotnych jako dodatkowego składnika betonów prowadzi do uzyskania już po 2 dniach kompozytów betonowych o wyższych wytrzymałościach w stosunku do betonów niemodyfikowanych popiołami.

Słowa kluczowe: projektowanie składu betonu, popioły lotne, tempo przyrostu wytrzymałości

WPROWADZENIE

Popiół lotny to drobnoziarnisty pył składający się głównie z kulistych, zeszkliwionych ziaren, otrzymany przy spalaniu pyłu węglowego, mający właściwości pucolanowe. Dodatek popiołu lotnego do betonu modyfikuje jego strukturę poprzez efekt wypełniający oraz właściwości pucolanowe. Wprowadzając popioły lotne do betonu, należy liczyć się z różnym ich wpływem na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu.

Dodatek popiołu lotnego może poprawić ciekłość mieszanki betonowej oraz jej urabialność. Poprawa urabialności oraz łatwość podawania mieszanki betonowej z dodatkiem popiołu lotnego przy użyciu pomp jest związana z „efektem łożyskowania”, wynikającym z prawie doskonale kulistego kształtu ziaren popiołów oraz ich dobrą miękkością. Upłynnienie mieszanki betonowej w wyniku wprowadzenia popiołów lotnych może prowadzić także do redukcji wody zarobowej, a więc obniżenia współczynnika woda/spoiwa. Konsekwencją tego jest wzrost wytrzymałości kompozytu betonowego. Dodatek popiołu lotnego może doprowadzić do wzrostu wodożądności oraz spadku urabialności w przypadku zastosowania popiołów o dużej stracie prażenia. Jest to spowodowane nieregularnym kształtem ziaren popiołów i ich porowatością w przypadku wzrostu niespalonego węgla w popiele lotnym.

Dodatek popiołu lotnego prowadzi do zmniejszenia skurczu betonu i zwiększenia jego odporności na agresję chemiczną. Zastosowanie popiołów lotnych do elementów masywnych jest bardzo dobrym rozwiązaniem, ponieważ obniża szybkość i ilość wydzielanego ciepła w procesie hydratacji, co zmniejsza ryzyko powstania spękań konstrukcji betonowej. Popioły lotne znacznie zwiększają odporność betonów w agresywnym środowisku siarczanowym.

Zastosowanie popiołów lotnych może prowadzić do obniżenia odporności betonów na działanie mrozu, zwłaszcza przy udziale środków odladzających. Powszechnie wiadomo, że do betonów mrozoodpornych stosuje się domieszki napowietrzające, aby wytworzyć w nich prawidłową strukturę porów. Wprowadzenie popiołów lotnych do takich mieszanek betonowych powoduje znaczne utrudnienie w ich prawidłowym napowietrzeniu. Równocześnie wraz ze wzrostem ilości popiołów lotnych w mieszance betonowej konieczne jest zastosowanie większej ilości domieszki napowietrzającej.

Popioły lotne powodują także opóźnienie przyrostu wytrzymałości wczesnej betonu w warunkach naturalnych, zwłaszcza w okresie zimowym. Ponadto przy zastosowaniu popiołów lotnych z cementami hutniczymi należy liczyć się z przyspieszoną karbonatyzacją betonu.

Wyniki badań Heinza i innych wykazały, że alkalia z popiołu lotnego oraz pewna część alkaliów pochodzących z cementu pozostają trwale związane w uwodnionych fazach i nie powodują pęcznienia produktów alkalia - reaktywna krzemionka.

Pomimo pewnych negatywnych aspektów stosowania popiołów lotnych stały się one odpadem najczęściej wykorzystywanym do wytwarzania kompozytów betonowych. Stosuje się je jako częściowy zamiennik cementu oraz rzadziej jako dodatkowy składnik betonu [1-4].

Popiół lotny może być wliczany do minimalnej ilości cementu w betonie oraz do równoważnego współczynnika wodno-cementowego za pomocą współczynnika k , którego wielkość zależy od klasy i rodzaju cementu:

- maksymalna ilość popiołu lotnego, uwzględniona w wartości k , powinna spełniać warunek: popiół lotny (P) / cement (C) $\leq 0,33$ (masowo).

Wartość wskaźnika $P/C \leq 0,33$ dotyczy cementu portlandzkiego CEM I oraz cementów CEM II: żuźlowego, łupkowego, wapiennego oraz cementów CEM II, które posiadają składniki drugorzędne w postaci pucolany i popiołu krzemionkowego. W przypadku cementów, które posiadają składniki główne w postaci pucolany oraz popiołu lotnego, wartość wskaźnika $P/C \leq 0,25$. Dla cementów, których głównym składnikiem dodatkowym są popioły krzemionkowe, wartość wskaźnika $P/C \leq 0,15$.

W przypadku zastosowania większych ilości popiołu lotnego jego nadmiaru nie należy uwzględniać przy obliczaniu równoważnego współczynnika $W/[C + k \times \text{popiół lotny}]$ oraz minimalnej ilości cementu;

- dla betonów zawierających cement CEM I oraz CEM II/A (oprócz cementu CEM II/A-V) dopuszcza się następujące wartości k :

- dla klasy wytrzymałościowej CEM 32,5 wartość $k = 0,2$
- dla klasy wytrzymałościowej CEM 42,5 i 52,5 wartość $k = 0,4$

Minimalna zawartość cementu wymagana w odpowiedniej klasie ekspozycji może być zmniejszona maksymalnie o ilość: $k \times$ (min. zawartość cementu w danej klasie ekspozycji - 200) kg/m^3 [5, 6].

1. SKŁADY BADANYCH BETONÓW

Do badanych betonów zastosowano cement CEM I 32,5R oraz mieszankę kruszyw naturalnych o punkcie piaskowym $PP = 37\%$ o uziarnieniu ciągłym, mieszczącym się w polu krzywych granicznych [2]. Mieszanka betonowa serii kontrolnej o stosunku $C/W = 2,0$ bez dodatku popiołu lotnego została zakwalifikowana do klasy konsystencji S2. Skład betonu kontrolnego na 1 m^3 wynosił: cement 385 kg; woda 192,5 l; kruszywo 1812 kg, domieszka upłynniająco- napowietrzająca 2,7 l.

Beton kontrolny (seria K) zmodyfikowano poprzez wprowadzenie do jego składu popiołu lotnego w maksymalnej dopuszczalnej przez normę ilości (beton serii P_1) [1], w połowie dopuszczalnej przez normę ilości (beton serii P_2) oraz jako dodatkowego składnika betonu - bez ujmowania cementu, dokonując jedynie korekty ilości kruszywa (beton serii P_3).

1.1. Modyfikacja betonu kontrolnego serii P_1

Beton kontrolny przeprojektowano, stosując maksymalną zawartość popiołu lotnego w jego składzie.

Skład wyjściowy betonu kontrolnego:

- Cement: $C = 385 \text{ kg/m}^3$
- Woda: $W = 192,5 \text{ l/m}^3$
- Kruszywo: $K = 1812 \text{ kg/m}^3$

Stosunek cementowo-wodny $C/W = 2,0$. Dla cementu CEM I 32,5R wartość współczynnika $k = 0,2$. Gęstość cementu $\rho_c = 3,1 \text{ g/cm}^3$. Gęstość popiołu lotnego $\rho_p = 2,2 \text{ g/cm}^3$. Gęstość mieszanki kruszyw $\rho_k = 2,65 \text{ g/cm}^3$. Maksymalna zawartość popiołu lotnego $P/C \leq 0,33$.

Maksymalna zawartość popiołu P:

$$P/C \leq 0,33 \rightarrow P \leq 0,33 \cdot C \quad (1)$$

Założono identyczną wodożądność mieszanki betonowej, tak więc:

$$\frac{W}{C} = \frac{W}{C + k \cdot P} \quad (2)$$

$k = 0,2$ (dla CEM I 32,5R); $W/C = 0,5$ (zgodnie ze składem wyjściowym betonu);

$$\frac{W}{C} = \frac{W}{C + k \cdot 0,33C} \Rightarrow 0,5 = \frac{192,5}{C + 0,2 \cdot 0,33 \cdot C} \rightarrow C = 362,2 \text{ kg} \quad (3)$$

Ilość cementu $m_C = 362,2 \text{ kg/m}^3$

Ilość popiołu lotnego P:

$$P = 0,33C \rightarrow P = 0,33 \cdot 362,2 = 119,5 \text{ kg/m}^3 \quad (4)$$

Obliczamy objętość spoiwa (cementu i popiołu lotnego) w betonie V_{C+P} :

gęstość popiołu lotnego $\rho_p = 2,2 \text{ kg/dm}^3$;

gęstość cementu $\rho_c = 3,1 \text{ kg/dm}^3$

$$V_{C+P} = \frac{C}{\rho_c} + \frac{P}{\rho_p} = \frac{362,2}{3,1} + \frac{119,5}{2,2} = 171,1 \text{ dm}^3 \quad (5)$$

Objętość cementu w składzie wyjściowym wynosiła:

$$V_C = \frac{C}{\rho_c} = \frac{362,2}{3,1} = 116,8 \text{ dm}^3 \quad (6)$$

Ponieważ łączna objętość cementu i popiołu (V_{C+P}) jest większa niż objętość cementu V_C w składzie wyjściowym, zatem należy o taką samą objętość (V_{Korekta}) zmniejszyć ilość kruszywa:

$$V_{\text{Korekta}} = 171,1 - 116,8 = 54,3 \text{ dm}^3 \quad (7)$$

Objętość kruszywa w składzie wyjściowym V_K :

$$V_K = \frac{K}{\rho_k} = \frac{1812}{2,65} = 684 \text{ dm}^3 \quad (8)$$

Objętość kruszywa po korekcie $V_{\text{Korekta KR}}$:

$$V_{\text{Korekta KR}} = V_K - V_{\text{Korekta}} = 684 - 54,3 = 629,7 \text{ dm}^3 \quad (9)$$

co daje łączną ilość kruszywa w mieszance betonowej K_{Korekta} :

$$K_{\text{Korekta}} = 629,7 \cdot 2,65 = 1668,7 \text{ kg/m}^3 \quad (10)$$

Stosunek wodno-cementowy po wprowadzeniu popiołu lotnego do betonu:

$$\frac{W}{C} = \frac{W}{C + k \cdot P} = \frac{192,5}{362,2 + 0,2 \cdot 0,33 \cdot 362,2} = 0,5 \quad (11)$$

1.2. Modyfikacja betonu kontrolnego serii P₂

Przyjęto połowę maksymalnej dopuszczalnej zawartości popiołu:

$$P/C \leq 0,165 \rightarrow P \leq 165 \cdot C \quad (12)$$

Założono identyczną wodożądność mieszanki betonowej, tak więc:

$$\frac{W}{C} = \frac{W}{C + k \cdot P} \quad (13)$$

$k = 0,2$ (dla CEM I 32,5R); $W/C = 0,5$ (zgodnie ze składem wyjściowym betonu);

$$P = 0,165 \cdot C \quad (14)$$

$$\frac{W}{C} = \frac{W}{C + k \cdot 0,165 \cdot C} \Rightarrow 0,5 = \frac{192,5}{C + 0,2 \cdot 0,165 \cdot C} \rightarrow C = 372,7 \text{ kg} \quad (15)$$

Ilość cementu $m_C = 372,7 \text{ kg/m}^3$

Ilość popiołu lotnego P:

$$P = 0,165C \rightarrow P = 0,165 \cdot 372,7 = 61,5 \text{ kg/m}^3 \quad (16)$$

Obliczamy objętość spoiwa (cementu i popiołu lotnego) w betonie V:

gęstość popiołu lotnego $\rho_p = 2,2 \text{ kg/dm}^3$;

gęstość cementu $\rho_c = 3,1 \text{ kg/dm}^3$

$$V_{C+P} = \frac{C}{\rho_c} + \frac{P}{\rho_p} = \frac{372,7}{3,1} + \frac{61,5}{2,2} = 148,2 \text{ dm}^3 \quad (17)$$

Objętość cementu w składzie wyjściowym wynosiła:

$$V_C = \frac{C}{\rho_c} = \frac{385}{3,1} = 124,2 \text{ dm}^3 \quad (18)$$

Łączna objętość cementu i popiołu (V_{C+P}) jest większa niż objętość cementu V_C w składzie wyjściowym, zatem należy o taką samą objętość (V_{Korekta}) zmniejszyć ilość kruszywa:

$$V_{\text{Korekta}} = 148,2 - 124,2 = 24,0 \text{ dm}^3 \quad (19)$$

Objętość kruszywa w składzie wyjściowym:

$$V_{KR} = \frac{K}{\rho_k} = \frac{1812}{2,65} = 684 \text{ dm}^3 \quad (20)$$

Objętość kruszywa po korekcie $V_{Korekta KR}$:

$$V_{Korekta KR} = V_K - V_{Korekta} = 684 - 24 = 660 \text{ dm}^3 \quad (21)$$

co daje łączną ilość kruszywa w mieszance betonowej $K_{Korekta}$:

$$K_{Korekta} = 660 \cdot 2,65 = 1749 \text{ kg/m}^3 \quad (22)$$

Stosunek wodno-cementowy po wprowadzeniu popiołu lotnego do betonu:

$$\frac{W}{C} = \frac{W}{C + k \cdot P} = \frac{192,5}{372,7 + 0,2 \cdot 0,165 \cdot 372,7} = 0,5 \quad (23)$$

1.3. Modyfikacja betonu kontrolnego serii P₃

W serii P₃ przyjęto maksymalną ilość popiołów lotnych bez ujmowania spoiwa cementowego. Oznacza to, że popioły lotne w tej serii zostały dodane jako dodatkowy składnik. Dokonano jedynie korekty ilości kruszywa.

Ilość popiołów lotnych: P = 119,5 kg (wartość identyczna jak w serii P₁).

Objętość wprowadzonych popiołów lotnych V_P wynosi:

$$V_P = V_{Korekta} = \frac{P}{\rho_p} = \frac{119,5}{2,2} = 54,3 \text{ dm}^3 \quad (24)$$

Należy zmniejszyć objętość mieszanki kruszyw o objętość wprowadzonego dodatkowego składnika - popiołów lotnych

Objętość kruszywa po korekcie $V_{Korekta KR}$:

$$V_{Korekta KR} = V_K - V_{Korekta} = 684 - 54,3 = 629,7 \text{ dm}^3 \quad (25)$$

co daje łączną ilość kruszywa w mieszance betonowej $K_{Korekta}$:

$$K_{Korekta} = 629,7 \cdot 2,65 = 1669 \text{ kg/m}^3 \quad (26)$$

Składy badanych serii betonów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Składy badanych serii betonów w kg/m^3

Seria betonu	Skład mieszanek [kg/m^3]
--------------	-------------------------------------

	Cement	Popiół lotny	Woda	Kruszywo	Domieszka
Kontrolna K	385	–	192,5	1812	2,7
P ₁	362,2	119,5	192,5	1688	2,7
P ₂	372,2	61,5	192,5	1749	2,7
P ₃	385	119,5	192,5	1669	2,7

Dla wszystkich serii betonów wykonano oznaczenie konsystencji mieszanki betonowej oraz wytrzymałości na ściskanie po 2, 28 i 56 dniach.

2. WYNIKI OZNACZEŃ

Badanie konsystencji wykonano metodą stożka opadowego [7]. Wyniki badań zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Średnie wartości zawartości powietrza i opadu stożka badanych mieszanek betonowych

Badanie	Seria mieszanki betonowej			
	K	P ₁	P ₂	P ₃
Opad stożka [mm]	110	118	114	95
Klasa konsystencji S	S3	S3	S3	S2/S3

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po 2 i 28 dniach dojrzewania próbek w kąpeli wodnej w temperaturze 20°C. Uzyskane średnie wartości wytrzymałości na ściskanie przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie

Seria betonu	Średnia wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa], uzyskana po:		
	2 dniach	28 dniach	56 dniach
K	18,8	37,9	41,5
P ₁	16,1	34,5	43,1
P ₂	17,5	37,0	43,6
P ₃	19,3	41,5	47,1

WNIOSKI

Wyniki badań wskazują na pozytywny wpływ zastosowanych popiołów lotnych na parametry badanych mieszanek betonowych i betonów.

Badania cech mechanicznych potwierdziły spowolnienie tempa przyrostu wytrzymałości na ściskanie betonów z dodatkiem popiołów lotnych, zastosowanych jako częściowy zamiennik cementu (serie: P₁ i P₂). Po 2 dniach dojrzewania beton serii P₁, w którym zastosowano popiół w maksymalnej ilości, uzyskał średnią wytrzymałość na ściskanie niższą o 14,4% w stosunku do betonu kontrolnego. Analogicznie, spadek ten wyniósł 6,9% dla serii P₂, w której dozowano popiół lotny w połowie maksymalnej ilości. Beton, w którym zastosowano popiół lotny jako dodatkowy składnik, uzyskał najwyższą wartość wytrzymałości na ściskanie równą $f_{cm,2} = 19,3$ MPa. Po 28 dniach dojrzewania betony z dodatkiem popiołów lotnych, które dozowano jako częściowy zamiennik cementu, uzyskały także niższe wartości wytrzymałości na ściskanie w stosunku do betonu kontrolnego. Betony z dodatkiem popiołów lotnych (serie: P₁ oraz P₂), badane po 56 dniach dojrzewania uzyskały wytrzymałości wyższe o 4÷5% w stosunku do betonu kontrolnego. Beton, w którym zastosowano popiół lotny bez ujmowania cementu (seria P₃), uzyskał największą średnią wytrzymałość na ściskanie równą $f_{cm,56} = 47,1$ MPa. Jest to wartość wyższa o ponad 13% w stosunku do wytrzymałości betonu kontrolnego.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdza się, że popioły lotne są wartościowymi dodatkami do kompozytów betonowych. W przypadku zastosowania ich jako częściowego zamiennika cementu, powodują spowolnienie tempa przyrostu wytrzymałości betonów w pierwszym etapie ich dojrzewania. Zastosowanie popiołów lotnych jako dodatkowego składnika betonów prowadzi do uzyskania już po 2 dniach kompozytów betonowych o wyższych wytrzymałościach w stosunku do betonów niemodyfikowanych popiołami.

LITERATURA

- [1] Glinicki M.A., Dąbrowski M., Wpływ dodatku popiołu lotnego wapiennego na napowietrzenie mieszanki betonowej i charakterystykę porów w betonie. Popioły z energetyki, Warszawa 24-26 października 2010, Polska Unia Ubocznych Produktów Spalania, 2010.
- [2] Rajczyk J., Halbiniak J., Langier B., Technologia kompozytów betonowych w laboratorium i w praktyce, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2012.
- [3] Lutze D., Berg W., Popiół lotny w betonie, Polska Unia Ubocznych Produktów Spalania, Warszawa 2010.
- [4] Heinz D., Schmidt K., Urbonas L., Einsatz von Steinkohlflugasche (SFA) als Beton Zusatzstoff zur Vermeidung einer schädigenden Alkali - Kieselsäure - Reaktion (AKR) bei alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, Schlussbericht zum VGB - Forschungsvorhaben P245 (AiF - Nr 13605N), 2006.
- [5] PN-EN 206-1 Beton, część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [6] PN-EN 450 Popiół lotny do betonu.
- [7] PN-EN 12350-2 Badania mieszanki betonowej, Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.

DESIGNING THE COMPOSITION OF CONCRETE WITH FLY ASHES AND THEIR INFLUENCE ON INCREMENT RATE OF STRENGTH

This paper presents guidelines for design of concrete with fly ash. Four series of concrete have been designed. Investigations of compressive strength after 2, 28 and 56 days of hardening have been conducted for each of the concrete series.

Keywords: designing the composition of concrete, fly ashes, increment rate of strength