

Aneta NOWAK-MICHTA\*  
Politechnika Krakowska

## KOMPATYBILNOŚĆ POPIOŁÓW LOTNYCH Z DOMIESZKAMI

**Streszczenie.** W referacie przeanalizowano wpływ wielkości strat prażenia w popiołach lotnych na adsorpcję domieszek upłynniającej i napowietrzającej. Analizę przeprowadzono na podstawie wykonanych 64 napowietrzonych i nienapowietrzonych mieszanek betonowych, o zmiennym współczynniku wodno-spoiwowym, z dodatkiem popiołu lotnego. W programie badawczym zastosowano dodatek trzech, reprezentatywnych dla krajowej produkcji, popiołów lotnych, w ilości 0 ÷ 50%, należących do trzech kategorii strat prażenia A, B i C.

## COMPATIBILITY BETWEEN FLY ASHES AND ADMIXTURES

**Summary.** The influence of unburned carbon content in fly ash on superplasticized and air-entrained admixtures adsorption is analysed in the paper. The analyses were made on the basis research program made on 64 air-entrained and non air-entrained concrete mixes containing 3 fly ash types, belonging to all 3 categories of (A, B & C). The ashes have been added in doses ranging from 0 to 50% of cement replacement with different water-binder ratios.

### 1. Wprowadzenie

Popiół lotny jest obecnie najczęściej stosowanym dodatkiem do betonu. W zastosowaniach tych ujawnia on wiele cennych własności, korzystnie modyfikując cechy betonu od stadium mieszanki począwszy, poprzez procesy jego wiązania i twardnienia, na stadium eksploatacji konstrukcji skończywszy. Wprowadzona w 2006 roku nowelizacja normy PN-EN 450-1 dopuszcza stosowanie w betonach popiołów w trzech kategoriach strat prażenia: A ( $\leq 5\%$ ), B ( $2 \div 7\%$ ) i C ( $4 \div 9\%$ ). Zatem znacznie, poza innymi cechami,

\* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Janusz Mierzwa, prof. Politechniki Krakowskiej.

rozszerzono możliwość stosowania w betonach popiołów o stratach prażenia w zakresie 5÷9% (kategorie B i C).

Wpływ dodatku popiołu lotnego na własności mieszanki betonowej jest zmienny i zależy przede wszystkim od własności popiołu (uziarnienia i kształtu ziaren, składu chemicznego – głównie wielkości strat prażenia oraz składu mineralnego i struktury ziaren) [2, 3, 9]. Stąd, w literaturze znajdują się sprzeczne informacje dotyczące wpływu popiołu na własności mieszanki betonowej oraz kompatybilność popiołu z domieszkami.

Hornain [4] podaje, iż wielkość strat prażenia w popiele (5, 7 i 12%) nie wpływa na konsystencję mieszanki betonowej. Jiang i Malhotra [6] wykazali, iż popioły zarówno krzemionkowe, jak i wapniowe, o stratach prażenia poniżej 3,5%, powodują redukcję wodożądności. Przeciwny efekt uzyskano w [7], gdzie w miarę wzrostu wielkości strat prażenia oraz zawartości popiołu zaobserwowano zwiększanie wodożądności mieszanki.

Bilodeau i Malhotra [1] podają, iż betony HVFA (High Volume Fly Ash) bardzo dobrze współdziałają z superplastyfikatorami oraz większością domieszek napowietrzających, przy czym efekt działania w znaczący sposób zależy od rodzaju cementu i popiołu lotnego. Wyjątek stanowią popioły z dużą zawartością węgla, które wymagają znacznie większej ilości środka napowietrzającego.

Z literatury [2, 5, 8] wiadomo, iż wielkość strat prażenia w popiele jest głównym czynnikiem powodującym adsorpcję domieszek, w szczególności napowietrzającej. Pojawia się zatem pytanie, jak i czy tak duża wielkość strat prażenia w popiele (9%) wpłynie na interakcję z domieszkami?

## 2. Badania własne

### 2.1. Cel i zakres badań

Program badawczy miał na celu ocenę wpływu określonej ilości dodatku popiołu lotnego i jego własności na zapotrzebowanie na domieszki upłynniającą i napowietrzającą, dla uzyskania stałej konsystencji i poziomu napowietrzenia mieszanek betonowych. Receptury mieszanek zaprojektowano przy następujących założeniach:

- cztery poziomy dozowania popiołu lotnego  $\varphi$ : 0, 20, 35, 50% masy cementu (stosowano metodę prostego zastępowania cementu popiołem),

- cztery poziomy współczynnika wodno-spoiwowego (spoiwo = cement + popiół): 0,65; 0,55; 0,45; 0,38,
- trzy popioły lotne krzemionkowe, zgodne z PN-EN 450-1: 2006, w kategoriach strat prażenia A (1,9%), B (5,1%) i C (9,0%),
- dwa poziomy napowietrzenia 0 i 4,5% (domieszka napowietrzająca na bazie modyfikowanych żywic drzewnych),
- stała konsystencja mieszanki betonowej S3 (100 ÷ 150 mm opadu stożka) regulowana superplastyfikatorem na bazie polikarboksylianów.

Mieszanki wykonano z cementu CEM I 32,5R z Cementowni Górażdże i kruszywa naturalnego, o punkcie piaskowym 35% i maksymalnym ziarnie  $D=16$  mm.

W ramach badań własnych wykonano 64 serie mieszanek betonowych (4 mieszanki kontrolne nienapowietrzone, 4 mieszanki kontrolne napowietrzone i 56 mieszanek napowietrzonych i nienapowietrzonych z 20, 35 oraz 50% dodatkiem trzech popiołów lotnych). Pozostałych z kompletnego planu badań 16 mieszanek nie wykonano, ze względu na brak możliwości uzyskania odpowiedniego poziomu napowietrzenia lub braku urabialności wykonywanych mieszanek betonowych. Równocześnie wykonywano badania reologiczne, opisane w [6].

## 2.2. Własności zastosowanych popiołów lotnych

Dobór popiołów lotnych do badań poprzedzono gruntownym rozpoznaniem rodzajów i jakości popiołów lotnych, wytwarzanych przez wszystkie krajowe elektrownie i elektrociepłownie oraz wykonano wstępne badania testowe fizykochemicznych własności tych popiołów. Głównym kryterium przyjętym w doborze popiołów było wygenerowanie reprezentatywnych popiołów dla rodzimej produkcji o stratach prażenia w trzech kategoriach A, B i C, jednocześnie o podobnym składzie chemicznym i miąższości. Ze wszystkich przeanalizowanych popiołów wybrano trzy o własnościach fizycznych oraz chemicznych przedstawionych w tabeli 1.

## 2.3. Procedura badań

Mieszanki betonowe o objętości  $75 \text{ dm}^3$  wykonywano w mieszarce przeciwbieżnej o objętości  $200 \text{ dm}^3$ , w Laboratorium Zakładu Technologii Betonu PK, w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  i względnej wilgotności powyżej 60%.



Badania mieszanek betonowych przeprowadzano w ciągu 15 minut od wykonania zarobu. Próbkę do badań pobierano zgodnie z PN-EN 12350-1. Badania konsystencji mieszanek przeprowadzono metodą opadu stożka, zgodnie z PN-EN 12350-2, natomiast badania zawartości powietrza metodą ciśnieniową, zgodnie z PN-EN 12350-7. Pozostałą część mieszanki formowano do dalszych badań, realizowanych w ramach pracy doktorskiej.

Tabela 1

## Własności popiołów lotnych

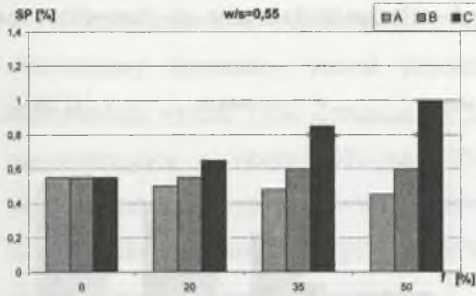
Cecha		Popiół A Elektrownia Łaziska	Popiół B Elektrownia Rybnik	Popiół C EC Bielsko	Wymagania PN-EN 450-1: 2006
SiO <sub>2</sub>		53,49%	48,71%	50,50%	SiO <sub>2</sub> ≥ 25% <sup>2)</sup> SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≥ 70% <sup>2)</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		25,80%	25,29%	29,98%	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		7,30%	5,36%	4,74%	
CaO całkowite		3,08%	3,26%	1,65%	CaO ≤ 10%
CaO wolne		0,10%	0,11%	0,10%	≤ 0,10%
Straty prażenia <sup>1)</sup>		<b>1,9%</b> (<3%)	<b>5,1%</b> (4-8)	<b>9,0%</b> (5-10)	<b>Kategoria A &lt; 5,0%</b> <b>Kategoria B 2,0 ÷ 7,0%</b> <b>Kategoria C 4,0 ÷ 9,0%</b>
SO <sub>3</sub>		0,40%	0,40%	0,35%	≤ 3,0%
Miałość Pozostałość na sicie 0,045mm		36	39	27	Kategoria N ≤ 40% Kategoria S ≤ 12%
Wskaźnik aktywności pucolanowej	po 28 dniach	97%	102%	94%	≥ 75%
	po 90 dniach	117%	124%	105%	≥ 85%
Gęstość		2,08 g/cm <sup>3</sup>	2,17 g/cm <sup>3</sup>	2,39 g/cm <sup>3</sup>	

– w nawiasach podano średnie przedziały wielkości, podane przez dostawcę popiołu

– dla popiołu lotnego z węgla wymagane uznanie, że spełnia wymaganie

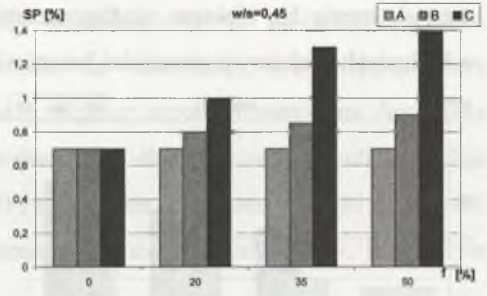
## 2.4. Wyniki badań

Wydozowane w seriach nienapowietrzonych dawki superplastyfikatora dla wszystkich trzech popiołów A, B i C, przy zmiennym procencie zastąpienia cementu popiołem  $\varphi = 0, 20, 35$  i  $50\%$  dla poszczególnych serii, o zmiennym współczynniku wodno-spoiwowym przedstawiono na rys. 1÷3. We wszystkich wykonanych mieszankach wydozowana dawka superplastyfikatora umożliwiła uzyskanie klasy konsystencji S3 – opad stożka  $100 \div 150$  mm, z dopuszczoną w pkt. 5.4.1. PN-EN 206-1: 2003 tolerancją  $\pm 30$  mm.



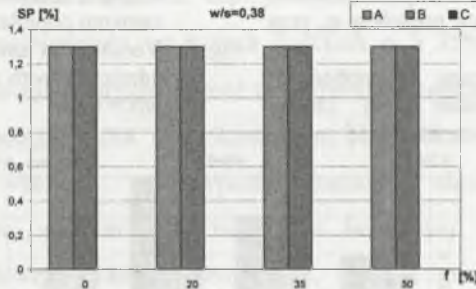
Rys. 1. Ilość wydozowanej domieszki płynniącej w zależności od procentu zastąpienia cementu popiołem  $\phi$ , przy  $w/s = 0,55$

Fig. 1. Variation of superplasticizer with cement replacement  $\phi$ , when  $w/s = 0,55$



Rys. 2. Ilość wydozowanej domieszki płynniącej w zależności od procentu zastąpienia cementu popiołem  $\phi$ , przy  $w/s = 0,45$

Fig. 2. Variation of superplasticizer with cement replacement  $\phi$ , when  $w/s = 0,45$



Rys. 3. Ilość wydozowanej domieszki upłynniącej w zależności od procentu zastąpienia cementu popiołem  $\phi$ , przy  $w/s = 0,38$

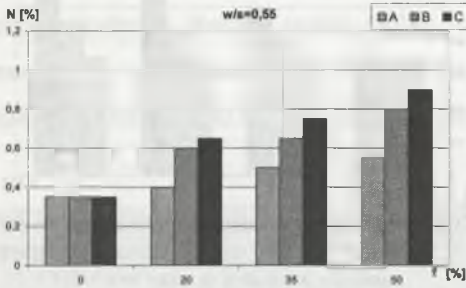
Fig. 3. Variation of superplasticizer with cement replacement  $\phi$ , when  $w/s = 0,38$

Wszystkie wydozowane dawki superplastyfikatora mieszczą się w zalecanym przez producenta przedziale dozowania  $0,2 \div 2,0\%$  masy spoiwa. Mieszanek o  $w/s = 0,38$  z popiołem C nie wykonano ze względu na brak urabialności, uniemożliwiający formowanie tychże mieszanek, bez względu na wielkość dozowanej dawki superplastyfikatora. W pozostałych mieszankach nie zaobserwowano utraty urabialności. Parametry reologiczne powyższych mieszanek zostały opisane w [7].

Wydozowanych dawek superplastyfikatora w mieszankach napowietrzonych nie przedstawiono, ponieważ w większości przypadków pokrywały się z seriami nienapowietrzonymi.

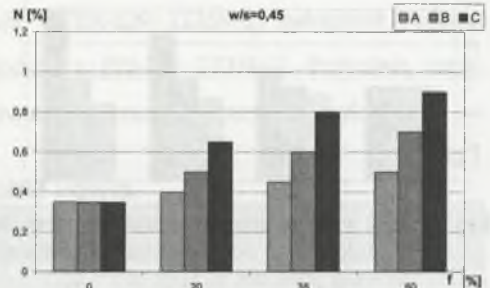
Na rys. 4÷6 przedstawiono, dla poszczególnych serii mieszanek napowietrzonych, wydozowane dawki domieszki napowietrzającej. Nie udało się uzyskać wymaganego poziomu napowietrzenia minimum 4%, jedynie w serii z popiołem C przy  $w/s = 0,38$  i  $\phi = 50\%$ . Mieszanki z popiołem C przy  $w/s = 0,55$  i  $0,38$  uzyskały zakładany poziom napowietrzenia, jednakże szybko traciły urabialność i wydaje się, iż osiągnięty poziom

napowietrzenia bez efektem niedogęszczenia tych mieszanek (zostanie to zweryfikowane w badaniach struktury porowatości betonów).



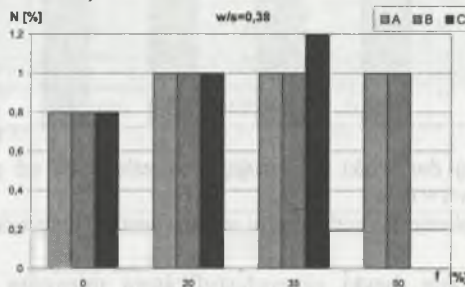
Rys. 4. Ilość wydołowanej domieszki napowietrzającej w zależności od procentu zastąpienia cementu popiołem φ, przy w/s = 0,55

Fig. 4. Variation of amount of applied air entraining admixture with cement replacement φ, when w/s = 0,55



Rys. 5. Ilość wydołowanej domieszki napowietrzającej w zależności od procentu zastąpienia cementu popiołem φ, przy w/s = 0,45

Fig. 5. Variation of amount of applied air entraining admixture with cement replacement φ, when w/s = 0,45



Rys. 6. Ilość wydołowanej domieszki napowietrzającej w zależności od procentu zastąpienia cementu popiołem φ, przy w/s = 0,38

Fig. 6. Variation of amount of applied air entraining admixture with cement replacement φ, when w/s = 0,38

### 3. Analiza uzyskanych wyników badań

W mieszankach betonowych z dodatkiem popiołu A, w miarę wzrostu zawartości popiołu, zaznacza się spadek zapotrzebowania na superplastyfikator (rys.1+3), co wskazuje nie tylko na brak adsorpcji domieszki upłynniającej przez ten popiół, ale także na jego działanie upłynniające. Zapotrzebowanie na domieszkę napowietrzającą w niewielkim stopniu wzrasta, w miarę wzrostu zawartości popiołu o około 10% na 10% dodatku popiołu, przy czym trend ten maleje, podobnie jak w przypadku efektu upłynniającego, w miarę spadku wielkości współczynnika wodno-spoiwowego. Zatem stosując kryterium przydatności popiołu w zakresie kompatybilności z domieszkami, popiół A jest przydatny do stosowania w betonie.



W mieszankach z popiołem B (rys. 1÷3), w miarę wzrostu zawartości popiołu, obserwujemy minimalny wzrost zapotrzebowania na domieszkę upłynniającą, który maksymalnie wynosi 10%. Zaznacza się znacznie większe zapotrzebowanie na domieszkę napowietrzającą o około 20% na 10% stosowanego dodatku, co w efekcie daje (w ekstremalnym przypadku  $\varphi=50\%$  i  $w/s = 0,38$ ) dwukrotne zwiększenie dawki domieszki. W przypadku zastosowania tego popiołu w betonach mrozoodpornych należy, już na tym etapie, rozważyć kryterium ekonomii.

W przypadku stosowania popiołu C pojawiają się problemy z urabialnością mieszanek przy  $w/s = 0,45$  i  $0,38$  i  $\varphi = 35$  i  $50\%$ . W przeciwieństwie do popiołu B, nie da się tego kompensować przez zwiększenie dawki superplastyfikatora, co na tym etapie przesądza o braku przydatności tego popiołu, w dużych ilościach  $\varphi \geq 35\%$ , w betonach o niskich współczynnikach wodno-spoiwowych. Popiół ten powoduje znaczną adsorpcję domieszek, szczególnie napowietrzającej, która w ekstremalnym przypadku wynosiła 250% ( $\varphi=50\%$  i  $w/s = 0,38$ ). Jak wiadomo, w przypadku domieszki napowietrzającej, uzyskanie odpowiedniej zawartości powietrza w mieszance betonowej nie gwarantuje jeszcze ukształtowania prawidłowej struktury porowatości, będącej gwarancją mrozoodporności betonu. Zatem już na tym etapie ze stosowania w betonach narażonych na działanie mrozu można, ze względów zarówno technologicznych, jak i ekonomicznych, wykluczyć popioły kategorii strat prażenia C.

#### 4. Wnioski

Przeprowadzona weryfikacja składów mieszanek betonowych z popiołem lotnym pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- popiół lotny w kategorii strat prażenia A jest kompatybilny z zastosowanymi domieszkami i nie powoduje ich adsorpcji, czego dowodem jest uzyskana dobra urabialność mieszanek betonowych, potwierdzona badaniami reologicznymi oraz uzyskany, zakładany poziom napowietrzenia,
- w miarę wzrostu wielkości strat prażenia oraz zawartości popiołu w spoiwie adsorpcja domieszek wzrasta, przy czym w znacznie większym stopniu adsorbowana jest domieszka napowietrzająca niż upłynniająca. Zatem identyfikatorem ilościowym adsorpcji domieszek przez popiół może zostać uznana kategoria strat prażenia,

- ze względu na pojawiające się problemy reologiczne, stosowanie dodatku popiołu w kategorii B powinno nie przekraczać 35% masy spoiwa, natomiast popiołu w kategorii C 20%. Wymaganie to ma szczególne zastosowanie w przypadku niskich współczynników wodno-spoiwowych (poniżej 0,45).

## LITERATURA

1. Bilodeau A., Malhotra V.M.: High-volume fly ash system: Concrete solution for sustainable development, *ACI Materials Journal*, No. 1, 2000, pp.41-48.
2. Coppola L. et al.: Influence of Unburnt Carbon in the Performance of Concrete Mixtures, SP178-15, 6th Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Tokushima, Japan - June 1998, pp.257-306.
3. Grzeszczyk S., Lipowski G.: Popioły lotne i ich wpływ na reologię i hydratacje cementów, Politechnika Opolska, Opole 2002.
4. Hornain H., et. al.: Influence of Residual Carbon in Fly Ash on Microstructure and Strength development of Mortars and Concretes, SP 132-2, 4th Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turkey – May 1992, pp. 21-36.
5. Hwang K.R., Noguchi T., Tomosawa F.: Effects of Fine Aggregate Replacement on the Rheology, Compressive Strength & Carbonation Properties of Fly Ash Mortar, SP 178-22, 6th Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Tokushima, Japan - June 1998, pp. 401-410.
6. Jiang L.H., Malhotra V.M.: Reduction in water demand of non-air-entrained concrete incorporating large volumes of fly ash, *Cem. & Concr. Res.*, V.30 (2000),1785-1789.
7. Nowak-Michta A., Urban M.: Wpływ własności popiołu lotnego na parametry reologiczne mieszanki betonowej, V KN-T MATBUD, 2007.
8. Wei S., et al.: Analysis of mechanism on water-reducing effect of fin ground slag, high-calcium fly ash, and low-calcium fly ash. *Cem. & Concr. Res.* V.33 (2003), pp.1119-1125.
9. Wesche K.: Fly Ash in concrete, Properties and Performance, E&FN Spon, 1991.