

**dr hab. inż. Michał A. Glinicki**

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

**mgr inż. Mariusz Dąbrowski**

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

## **Wpływ dodatku popiołu lotnego wapiennego na napowietrzenie mieszanki betonowej i charakterystykę porów w betonie**

### **Streszczenie**

Możliwości zastosowania popiołów lotnych wapiennych jako dodatków typu II do betonów konstrukcyjnych nie są dostatecznie rozpoznane, szczególnie w zakresie zagadnień trwałości betonów zawierających takie popioły. Referat przedstawia wyniki badania stabilności porów powietrznych w mieszankach betonowych, zawierających popiół lotny wapienny oraz wyniki badania charakterystyki porów powietrznych w betonie stwardniałym. Mieszanki betonowe napowietrzne zaprojektowano zgodnie z wymaganiami wysokiej odporności betonu na agresję mrozu i środków odladzających. Część cementu portlandzkiego zastępowano popiołem lotnym wapiennym, przy założeniu współczynnika efektywności dodatku. Na wykonanych próbkach betonu przeprowadzono badania parametrów mikrostruktury porów powietrznych i sformułowano wnioski dotyczące możliwości napowietrzania mieszanek zawierających popiół lotny wapienny.

### **1. Wprowadzenie**

Możliwości zastosowania popiołów lotnych krzemionkowych jako dodatków typu II do betonów konstrukcyjnych są dobrze rozpoznane, popioły krzemionkowe wykorzystuje się rutynowo w technologii betonu na podstawie wymagań określonych w normach PN-EN 450-1 oraz PN-EN 206-1. Krajowe popioły lotne wapienne nie są praktycznie stosowane w technologii produkcji cementu i betonu z przyczyn przedstawionych w [1]. Liczne publikacje cytowane w [1] sugerują znaczny potencjał wykorzystania popiołów lotnych wapniowych w betonie, jednak wiele zagadnień technicznych nie zostało dotąd systematycznie rozpoznanych. Należą do nich m.in. zagadnienia trwałości betonów z dodatkiem popiołów lotnych wapiennych w środowisku agresji mrozu i ewentualnie środków odladzających. Agresja kategorii XF, zgodnie z normą PN-EN 206-1, występuje przede wszystkim w przypadku elementów drogowych obiektów inżynierskich i zewnętrznych elementów konstrukcji betonowych, znajdujących się strefach rozbryzgów i nad morzem. Znane i stosowane od wielu lat podejście do wykonania betonów mrozoodpornych polega na napowietrzaniu mieszanki betonowej przy użyciu domieszek chemicznych napowietrzających, w taki sposób, aby uzyskać pożądaną mikrostrukturę porów powietrznych w betonie. Właściwa wielkość i rozmieszczenie porów powietrznych jest koniecznym, chociaż nie jedynym, warunkiem wysokiej trwałości betonu w środowisku agresji mrozu i środków odladzających. Jak wiadomo z publikacji [2-3], w przypadku napowietrzania mieszanek betonowych z dodatkami popiołów lotnych może wystąpić negatywna interakcja polegająca na adsorpcji hydrofobowych cząstek domieszki na powierzchni niespalonego węgla, pozostającego w popiołach. Wraz ze wzrostem zawartości węgla i jego powierzchni właściwej następuje większa adsorpcja domieszki napowietrzającej

[3]. Na efektywność domieszki napowietrzającej w mieszance betonowej wpływa negatywnie obecność jonów  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$ , przechodzących ze składników mineralnych mieszanki do wody zarobowej; obecność jonów alkalicznych w roztworze powoduje wytrącanie się nierozpuszczalnych związków ze środkiem powierzchniowo-czynnym z domieszki napowietrzającej [4]. Zjawisko to może pojawić się w przypadku stosowania popiołów lotnych o dużej zawartości reaktywnego tlenku wapnia i ewentualnie utrudniać właściwe napowietrzenie mieszanek betonowych zawierających popioły lotne wapienne. W konsekwencji projektowanie i wykonanie betonów mrozoodpornych może napotykać na poważne trudności.

W celu rozpoznania wpływu popiołów lotnych wapiennych na skuteczność napowietrzania betonu podjęto badania doświadczalne na mieszankach zawierających popiół z Elektrowni Bełchatów. Praca badawcza została wykonana jako część większego projektu [1], zatem inne właściwości techniczne betonów z popiołem z Elektrowni Bełchatów są przedmiotem innych publikacji. Zakres badań objął zarówno popioły nieprzetworzone, jak i przetworzone przez przemiał do określonej powierzchni właściwej.

## 2. Opis badań doświadczalnych

### 2.1 Materiały do badań

Program badań obejmował określenie wpływu dodatku popiołu lotnego wapiennego na efektywność napowietrzania mieszanki betonowej. Do badań użyto następujących materiałów:

- cement CEM I 42,5R z Cementowni Góraźdze,
- cement CEM I 42,5N-MSR/NA z Cementowni Warta,
- cement CEM I 42,5N-HSR/NA z Cementowni Chełm,
- popiół lotny wapienny pochodzący z Elektrowni Bełchatów, którego skład chemiczny oznaczony metodą XRF i właściwości fizyczne przedstawiono w tabeli 1 i 2,
- piasek kwarcowy 0 - 2 mm,
- grys amfibolowy frakcji 2 - 8 mm i 8 - 16 mm z Zakładu Przerobczego „Piława Górna” – Dolnośląskie Surowce Skalne sp. z o.o.
- woda destylowana,
- domieszki chemiczne do betonu:
  - superplastyfikator: BASF: Glenium Sky 591
  - napowietrzająca: BASF: Micro Air 301-2

Tabela 1. Skład chemiczny popiołu lotnego wapiennego z Elektrowni Bełchatów (wyniki uzyskane w laboratorium Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych - Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie)

Popiół lotny wapienny	Składnik, [%]											
	LOI	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO <sub>w</sub>
Partia I <sup>*)</sup>	2,56	33,62	19,27	5,39	31,3	1,85	3,91	0,11	0,31	0,17	1,21	2,87
Partia II <sup>**)</sup>	3,43	35,41	21,86	6,11	25,6	1,49	4,22	0,13	0,16	0,16	1,22	1,24

<sup>\*)</sup> popiół pobrany dnia 16.03.2010 roku, <sup>\*\*)</sup> popiół pobrany dnia 19.05.2010 roku

Tabela 2. Właściwości fizyczne popiołów lotnych wapiennych (wyniki uzyskane w laboratorium Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych - Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie)

	Gęstość, g/cm <sup>3</sup>		Miałość - pozostałość na sicie 45µm		Powierzchnia właściwa wg Blaine'a, cm <sup>2</sup> /g	
	Partia I	Partia II	Partia I	Partia II	Partia I	Partia II
"Surowy" <sup>*)</sup>	2,62	2,58	38%	35,4%	2860	4400
"10 min" <sup>**)</sup>	2,77	-	23%	-	3500	-
"15 min" <sup>**)</sup>	-	2,70	-	13,3%	-	6510
"28 min" <sup>**)</sup>	2,75	-	10,5	-	3870	-

<sup>\*)</sup> popiół nieprzetworzony; <sup>\*\*)</sup> popiół mielony w młynku okresowym (podano czas mielenia)

Obie partie popiołów mają zbliżony skład chemiczny. Największe różnice występują w zawartości wolnego tlenku wapnia, ale jego zawartość pozostaje na niskim poziomie. Straty prażenia są niskie, ale w przypadku popiołu partii II nieco przekraczają 3%. Odmienne są natomiast właściwości fizyczne. Jak podano w tabeli 2, powierzchnia właściwa popiołów partii I jest zbliżona do rozwinięcia powierzchni cementów portlandzkich, natomiast w popiołach partii II stwierdzono prawie dwukrotny wzrost powierzchni właściwej.

## 2.2 Mieszanki betonowe i próbki

Wykonano serię mieszanek betonowych, w których 15% i 30% masy cementu zastąpiono popiołem lotnym wapiennym z uwzględnieniem przyjętego współczynnika efektywności dodatku " $k=0,4$ ". Zawartość cementu w betonie bez dodatków wynosiła 350 kg/m<sup>3</sup>, przyjęto stały stosunek  $w/s = 0,45$ , przy czym  $s=c+k*p$  ( $s$  - zawartość spoiwa;  $c$  - zawartość cementu;  $p$  - zawartość popiołu), opad stożka dla klasy konsystencji S3 oraz zawartość powietrza w mieszance od 5% do 8%. Skład sporządzonych mieszanek betonowych przedstawiony został w tabeli 3, a podstawowe właściwości mieszanek podano w tabeli 4. Wykonano normowe próbki sześciennie o boku 150 mm i przechowywano w warunkach wysokiej wilgotności przez 28 dni. Po okresie dojrzewania z powyższych próbek przygotowano zgłady mikroskopowe, na których przeprowadzono badanie rozmieszczenia porów w betonie stwardniałym.

## 2.3 Metody badawcze

Określenie wpływu dodatku popiołu lotnego wapiennego na napowietrzenie mieszanki betonowej i zawartość porów w betonie stwardniałym przeprowadzono następującymi metodami:

- badanie wskaźnika piany (ang. *foam index*) - nienormowe badanie polegające na określeniu adsorpcji domieszki napowietrzającej na ziarnach spoiwa w roztworze wodnym; celem pomiarów jest porównanie wpływu dodatków mineralnych do cementu na tworzenie się stabilnej piany [2], [4],
- badanie stabilności piany (ang. *foam drainage*) - nienormowe badanie służące do oceny efektywności działania domieszek chemicznych, używanych do napowietrzania mieszanek cementowych; na podstawie badania stabilności piany możliwe jest określenie efektywności współdziałania domieszki napowietrzającej z innymi domieszkami chemicznymi, np. upłynniającymi, przyspieszającymi wiązanie itp. [5],
- oznaczenie zawartości powietrza w mieszance zgodnie z PN-EN 12350-7:2009,
- oznaczenia charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie metodą zgodną z normą PN-EN 480-11: 2008; pomiar parametrów mikrostruktury porów powietrznych wykonano przy pomocy komputerowego systemu automatycznej analizy obrazu [6].

Uzupełnieniem tych metod były badania normowych właściwości mieszanki betonowej, tj. :

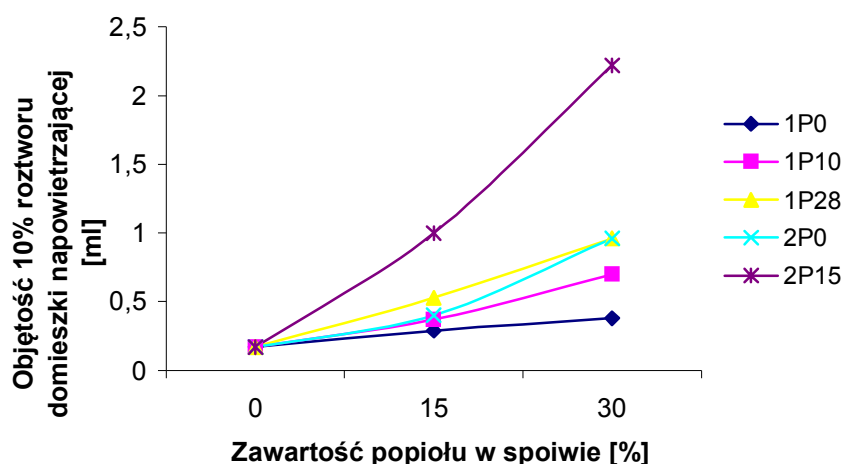
- konsystencji metodą opadu stożka według normy PN-EN 12350-2:2009,
- gęstości objętościowej według normy PN-EN 12359-6:2009,
- temperatury mieszanki betonowej po około 10 min. od zakończenia mieszania.

Badanie wskaźnika piany polegało na sporządzeniu kilku mieszanin. Pierwszą była mieszanina odniesienia składająca się z 10g cementu i 25 ml wody destylowanej. Kolejnymi natomiast były mieszaniny, w których kolejno 1,5g oraz 3 g cementu zastąpiono popiołem lotnym wapiennym. Składniki zamknięto w szklanej menzurce o średnicy 80 mm i wymieszano - wstrząsając przez ok. 60 sekund do całkowitego wymieszania składników. Dalsza część badania polegała na dodawaniu 10% wodnego roztworu domieszki napowietrzającej - każdorazowo w ilości dwóch kropli (ok. 0,04ml). Po każdym dodaniu domieszki pojemnik z mieszaniną był zamykany i wstrząsany przez ok. 15 sekund. Następnie prowadzono obserwację piany na powierzchni roztworu. Za punkt końcowy badania przyjęto moment, gdy piana powstała na powierzchni mieszaniny utrzymywała się minimum przez 45 sekund.

Badanie stabilności piany przeprowadzono zgodnie z procedurą opisaną w pracy [5]. Wykonuje się mieszaninę składającą się z: 130 ml wody destylowanej, 20 ml domieszki uplastyczniającej bądź upłynniającej, 10 ml domieszki napowietrzającej, 20 g cementu (lub cementu z dodatkami mineralnymi). Składniki miesza się przez 15 sekund w mikserze, a następnie niezwłocznie przelewa jego zawartość do cylindra miarowego o pojemności 1000 ml. Obserwuje się poziom granicy ciecz - piana i rejestruje odczyty co 5 minut przez godzinę od momentu umieszczenia mieszaniny w naczyniu pomiarowym.

### 3. Wyniki badań

Badania wskaźnika piany przeprowadzono dla domieszki Basf: Micro Air 301-2 i cementu z cementowni Górażdże. Wyniki przedstawione zostały jako wartości średnie z dwóch pomiarów na rys.1. Widoczna jest praktycznie liniowa zależność ilości domieszki napowietrzającej od zawartości popiołu lotnego wapiennego, zarówno z partii 1, jak i partii 2.

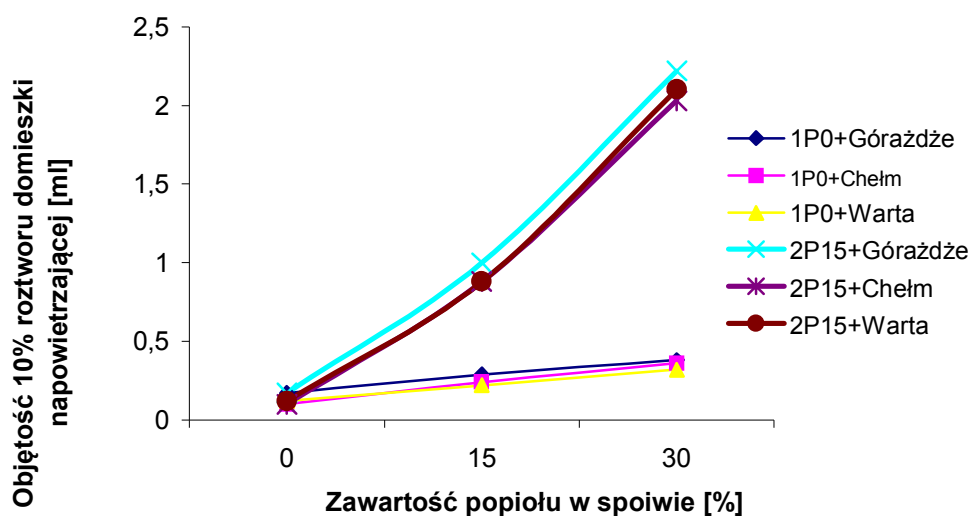


Rys. 1. Wskaźnik piany wyrażony objętością roztworu domieszki napowietrzającej w funkcji zawartości dodatku popiołu lotnego wapiennego

Wraz ze zwiększającą się ilością dodatku popiołu wzrasta zapotrzebowanie na domieszkę napowietrzającą. Zatem mielenie popiołów wapiennych powoduje zwiększenie ilości

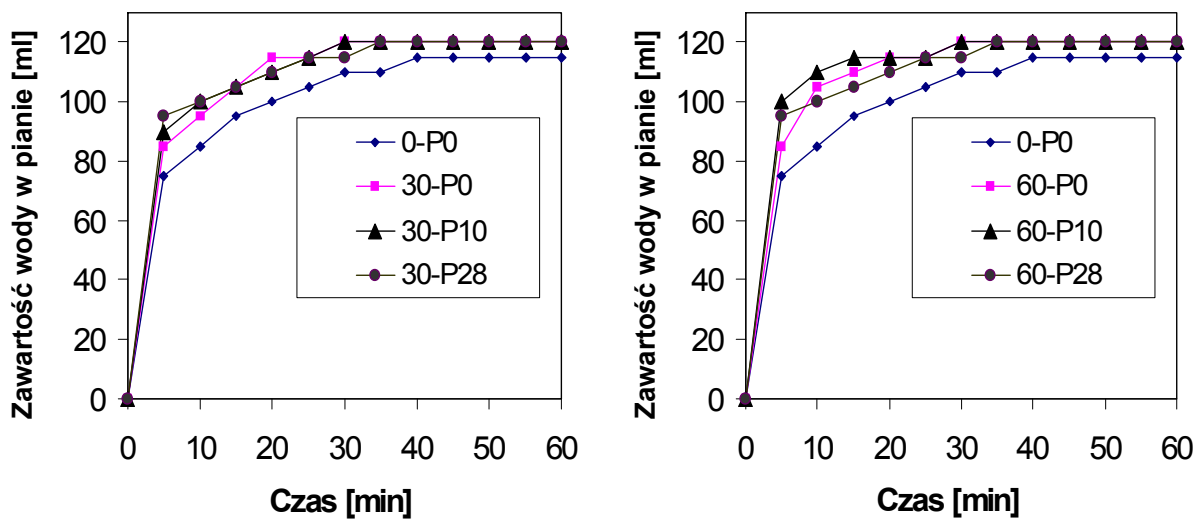
domieszki chemicznej, niezbędnej do osiągnięcia stabilnej piany. Przyczyną jest najprawdopodobniej zwiększenie powierzchni właściwej ziaren popiołu, na których możliwa jest adsorbcja. W przypadku 30% dodatku popiołu z partii I o największej powierzchni właściwej (1P<sub>28</sub>) stwierdzono około pięciokrotny wzrost zawartości domieszki. W skrajnym przypadku popiołów partii II (2P<sub>15</sub>) niezbędna ilość domieszki napowietrzającej była około dwunastokrotnie większa niż w przypadku cementu bez dodatku popiołowego. Zwiększenie rozdrobnienia popiołu z partii II do powierzchni właściwej według Blaine'a powyżej 6500 cm<sup>2</sup>/g wpływało niekorzystnie na możliwość utworzenia piany przy użyciu domieszki napowietrzającej.

Wskaźnik piany oznaczony został także w przypadku dla trzech cementów portlandzkich, pochodzących z różnych cementowni, różniących się przede wszystkim składem fazowym, a w szczególności zawartością glinianu trójwapieniowego (C<sub>3</sub>A). Zawartość C<sub>3</sub>A wynosiła 10%, 4% i 1,85% odpowiednio w przypadku cementu z Cementowni Góraźdze, Warta i Chełm. Na rys. 2 przedstawiono wyniki badań wskaźnika piany z wybranymi popiołami, które wykazują najmniejszy (1P<sub>0</sub>) i największy (2P<sub>15</sub>) efekt adsorpcji domieszki. Przy obu rodzajach popiołu lotnego wapiennego uwidacznia się jedynie niewielki wpływ rodzaju cementu na ilość domieszki niezbędnej do wytworzenia stabilnej piany. Niewielkie różnice mogą być spowodowane niekorzystnym wpływem glinianów na łańcuchy związków będących bazą domieszki – najbardziej niekorzystny efekt występuje w przypadku cementu o najwyższej zawartości C<sub>3</sub>A, tj. w przypadku cementu z cementowni Góraźdze; w pozostałych przypadkach różnice są statystycznie nieistotne.



Rys. 2. Wskaźnik piany dla cementów z cementowni Góraźdze, Chełm i Warta z popiołami 1P<sub>0</sub> i 2P<sub>15</sub>

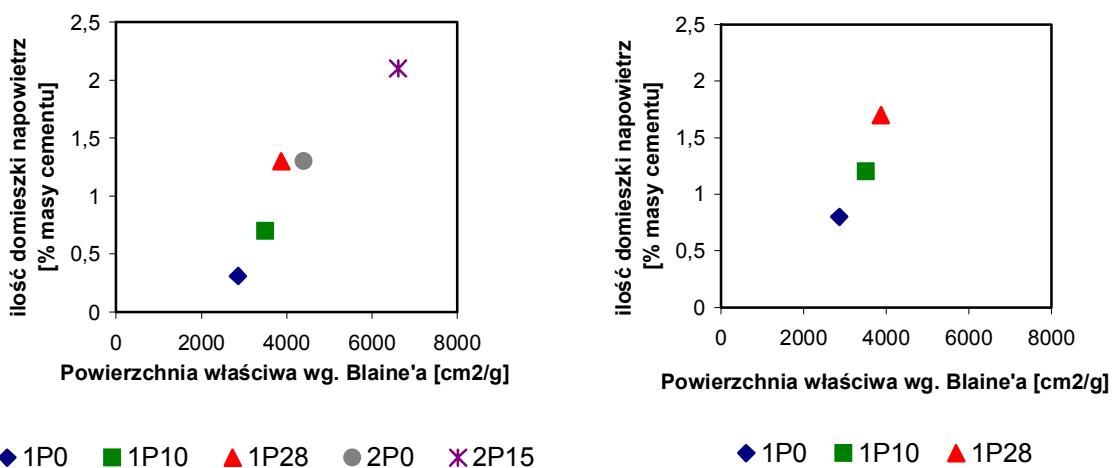
Badanie stabilności piany przeprowadzono stosując zestaw dwóch domieszek chemicznych, wybranych do sporządzenia mieszanek betonowych: superplastyfikator - Glenium Sky 591 oraz domieszki napowietrzającej - Micro Air 301-2. Pomiar został wykonany w przypadku cementu bez dodatków (cementownia Góraźdze), a także dla spoiw, w których cement częściowo zastąpiono 30% i 60% dodatkiem popiołu lotnego wapiennego z partii I. Wyniki badań zostały przedstawione na rys. 3. Skuteczność domieszek chemicznych napowietrzających jest tym lepsza, im wolniej oddziela się woda z piany powstałej po zmieszaniu domieszki z wodą i spoiwem.



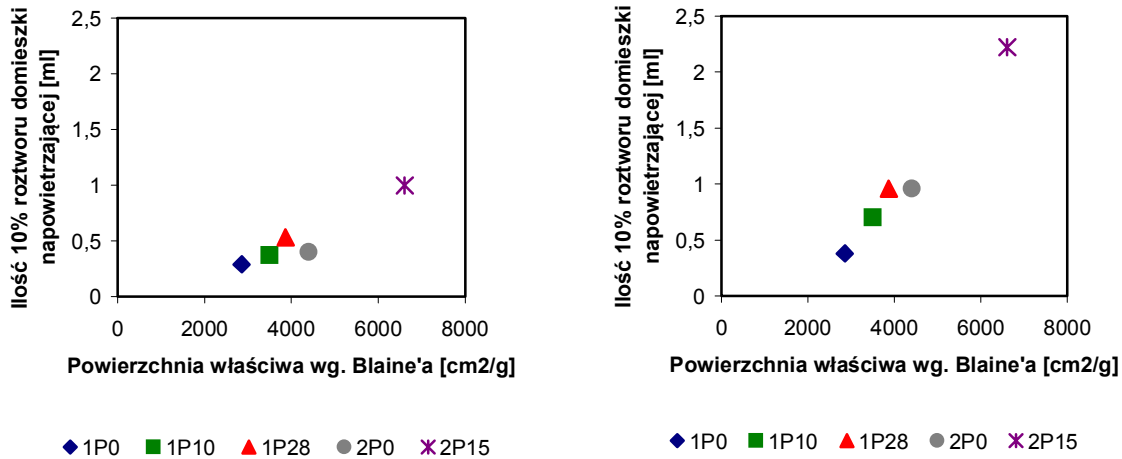
Rys3. Przebieg odwadniania piany w funkcji czasu dla spoiw z 30% (po lewej) i 60% (po prawej) dodatkiem popiołu lotnego wapiennego z partii I.

Wykresy ilustrują uzależnienie stabilności piany od ilości dodatku popiołu lotnego wapiennego, zastępującego część cementu. Im więcej popiołu jest w spoiwie, tym szybciej następuje oddzielenie się wody. Największa różnica wywołana obecnością zmiennej ilości popiołu w spoiwie widoczna jest w czasie od 5 do 30 minut do początku pomiaru. W przypadku 30% dodatku popiołu, wzrost ilości wody w pianie następuje wolniej niż w przypadku 60% dodatku.

Na rys.4 przedstawiona została zależność ilości domieszki napowietrzającej, użytej do sporządzenia mieszanki betonowej o założonej zawartości powietrza, od rozdrobnienia popiołów, wyrażonego powierzchnią właściwą według Blaine'a. Zależność jest zbliżona do liniowej: wraz ze wzrostem rozdrobnienia dodatku wzrasta potrzebna ilość domieszki napowietrzającej.



Rys. 4. Zależność zawartości domieszki napowietrzającej w mieszankach betonowych od powierzchni właściwej popiołu lotnego wapiennego (zawartość popiołu 15% po lewej, 30% po prawej stronie)

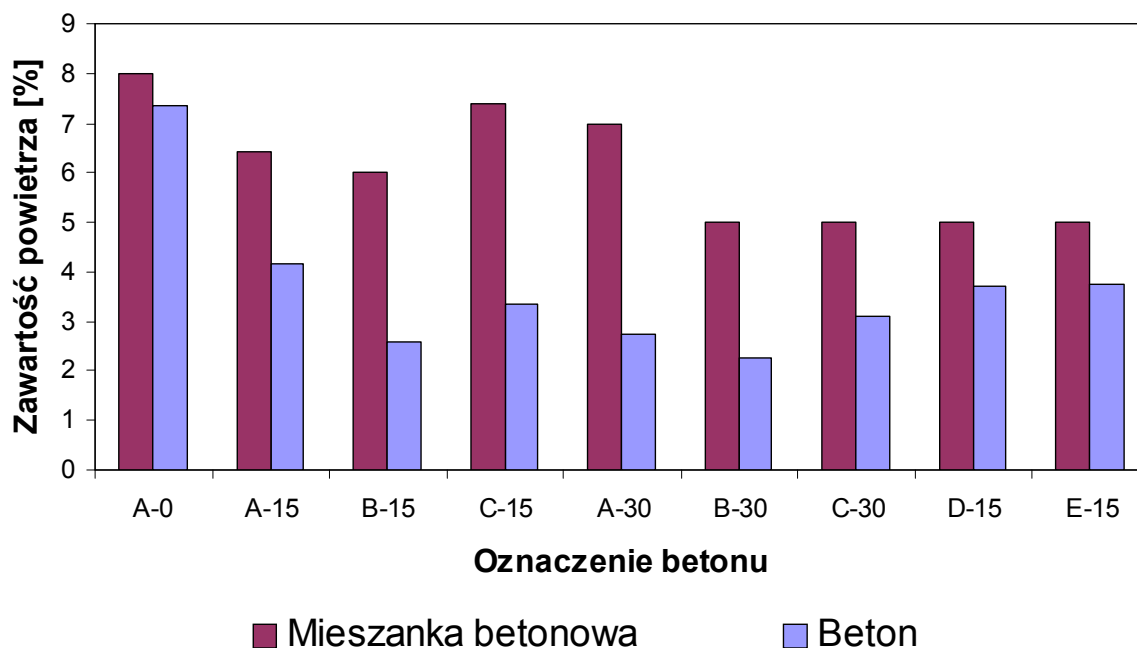


Rys. 5. Zależność zawartości 10% roztworu domieszki napowietrzającej od powierzchni właściwej popiołu lotnego wapiennego, określona w badaniu wskaźnika piany (zawartość popiołu 15% po lewej, 30% po prawej stronie)

Na rys. 5 przedstawiono korelację wskaźnika piany i powierzchni właściwej popiołów lotnych wapiennych, stosowanych z cementem Górażdże. W tym przypadku, podobnie jak na rys.4, widoczny jest liniowy charakter zależności pomiędzy rozdrobnieniem popiołu a ilością użytego roztworu domieszki. W odróżnieniu od zależności pokazanej na rys.4, wyniki tych pomiarów nie są obarczone wpływem zmiennej konsystencji mieszanki betonowej i zróżnicowanej zawartości powietrza.

Na podstawie wyników badań mikrostruktury porów w stwardniałym betonie dokonano porównania ilości powietrza zmierzonego metodą ciśnieniową w mieszance betonowej i zawartości powietrza określonej na zglądach wykonanych z betonu stwardniałego. Wyniki zostały przedstawione na rys. 6. Wprowadzenie dodatku popiołu lotnego wapiennego powoduje znaczącą tendencję do ucieczki pęcherzyków powietrza z mieszanki betonowej. W przypadku betonu bez dodatków popiołowych różnica zawartości powietrza w mieszance i w betonie stwardniałym była mniejsza niż 1% w wartościach bezwzględnych (względna różnica około 10 %). W przypadku betonów z dodatkiem popiołu względne różnice były większe, tj. w zakresie od 25% (D-15 i E-15) do około 60% (beton A-30). Prawdopodobnie tak duże różnice były wywołane zmianami lepkości mieszanki betonowej z dodatkiem popiołów lotnych wapiennych, ujawniające się poprzez zmianę konsystencji mieszanek.

Charakterystykę systemu porów powietrznych w betonie, określoną zgodnie z PN-EN 480-11, przedstawiono w tabeli 5. Nie stwierdzono jednoznacznych zależności ilościowych parametrów mikrostruktury porów od zawartości dodatku popiołu lotnego wapiennego w betonie. Interesujące spostrzeżenie dotyczy zawartości mikroporów, tzn. porów o wymiarach mniejszych od 300  $\mu\text{m}$ :  $A_{300}$  stanowi od około 30% do 50% objętości porów powietrznych. Jest to efekt bardzo korzystny z uwagi na zapewnienie mrozoodporności betonu. Takie proporcje rozkładu wielkości porów świadczą najprawdopodobniej o tym, że stwierdzona ucieczka pęcherzyków powietrza z mieszanek dotyczy w przeważającej części dużych porów powietrznych, tj. większych od 300  $\mu\text{m}$ . Różnice zawartości powietrza w betonie z popiołem lotnym wapiennym (od 2,27% do 4,17%) są jedną z przyczyn znacznych różnic pomiędzy wskaźnikami rozmieszczenia porów  $\bar{L}$ , których wartości mieszczą się w granicach od 0,21 mm do 0,39 mm.



Rys. 6. Zawartość powietrza w betonie stwardniałym i zawartość powietrza w mieszance betonowej

Tabela 5. Wyniki oznaczania charakterystyki porów powietrznych w próbkach betonu zgodnie z PN-EN 480-11

Oznaczenie betonu	$\bar{A}$ [%]	$\alpha$ [ $\text{mm}^{-1}$ ]	$\bar{L}$ [mm]	$A_{300}$ [%]
A-0	7,36	22,49	0,16	2,80
A-15	4,17	18,64	0,30	1,36
B-15	2,59	17,76	0,39	0,92
C-15	3,35	20,90	0,30	1,04
A-30	2,73	33,25	0,21	1,43
B-30	2,27	27,56	0,28	1,21
C-30	3,10	24,13	0,28	1,44
D-15	3,73	25,82	0,23	1,86
E-15	3,77	17,26	0,34	1,11



Tabela 3. Skład mieszanek betonowych z dodatkiem popiołów lotnych wapiennych

		Zawartość składników [kg/m <sup>3</sup> ] w mieszankach betonowych								
		A-0	A-15	B-15	C-15	A-30	B-30	C-30	D-15	E-15
<b>Cement Górażdże</b>	<b>CEM I 42,5R</b>	350	298	298	298	245	245	245	298	298
<b>Piasek</b>	<b>0-2</b>	660	570	570	570	480	480	480	570	570
<b>Grys amfibolowy</b>	<b>2-8</b>	590	590	590	590	590	590	590	590	590
	<b>8-16</b>	640	640	640	640	640	640	640	640	640
<b>Woda</b>	<b>wodociągowa</b>	158	158	158	158	158	158	158	158	158
<b>Popiół lotny wapienny</b>	<b>Belchatów</b>	0	133	133	133	263	263	263	133	133
<b>Rodzaj popiołu</b>		-	1P <sub>0</sub> <sup>*)</sup>	1P <sub>10</sub> <sup>*)</sup>	1P <sub>28</sub> <sup>*)</sup>	1P <sub>0</sub> <sup>*)</sup>	1P <sub>10</sub> <sup>*)</sup>	1P <sub>28</sub> <sup>*)</sup>	2P <sub>0</sub> <sup>*)</sup>	2P <sub>15</sub> <sup>*)</sup>
	<b>l/m<sup>3</sup></b>	<b>2,1</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>2,3</b>	<b>7,4</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>6,0</b>
<b>Superplastyfikator</b>	<b>% masy cementu</b>	<b>0,6</b>	<b>0,9</b>	<b>0,9</b>	<b>0,7</b>	<b>2,1</b>	<b>1,7</b>	<b>1,4</b>	<b>2,9</b>	<b>1,7</b>
	<b>nazwa firmowa</b>	Glenium SKY 591								
	<b>baza domieszki</b>	Etery polikarboksylenowe								
	<b>l/m<sup>3</sup></b>	<b>0,5</b>	<b>1,1</b>	<b>2,5</b>	<b>4,5</b>	<b>3,0</b>	<b>4,3</b>	<b>6,0</b>	<b>4,5</b>	<b>7,4</b>
<b>Domieszka napowietrzająca</b>	<b>% masy cementu</b>	<b>0,14</b>	<b>0,31</b>	<b>0,7</b>	<b>1,3</b>	<b>0,8</b>	<b>1,2</b>	<b>1,7</b>	<b>1,3</b>	<b>2,1</b>
	<b>nazwa firmowa</b>	Micro Air 301-2								
	<b>baza domieszki</b>	Glikol polietylenowy								

<sup>\*)</sup> oznaczenia: 1,2 - numer partii popiołu; 0,10,15,28 - czas mielenia w młynku okresowym

Tabela 4 Właściwości mieszanek betonowych z dodatkiem popiołów lotnych wapiennych

		Oznaczenie mieszanki betonowej								
		A-0	A-15	B-15	C-15	A-30	B-30	C-30	D-15	E-15
<b>Opad stożka</b>	<b>mm</b>	140	100	120	170	200	150	200	110	140
<b>Temperatura</b>	<b>° C</b>	21	21,5	20,5	21	21	26	21	22	24
<b>Zawartość powietrza</b>	<b>%</b>	8,0	6,4	6,0	7,4	7,0	5,0	5,0	5,0	5,0
<b>Gęstość objętościowa</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	2420	2430	2430	2420	2410	2420	2430	2450	2460

## 4. Dyskusja uzyskanych wyników

Wyniki badań wskazują ogólnie na negatywny wpływ dodatków popiołów lotnych wapiennych na napowietrzenie mieszanki i zawartość porów w betonie stwardniałym. Są to spostrzeżenia częściowo zgodne z oczekiwaniami, a częściowo odmienne od danych podawanych w publikacjach amerykańskich. Klieger i Gebler [5] zbadali stabilność napowietrzenia w mieszance w zależności od zawartości popiołów lotnych krzemionkowych i wapiennych, stwierdzając, że obecność popiołów krzemionkowych wpływa silniej na redukcję zawartości powietrza w mieszance niż obecność popiołów wapiennych. Jednocześnie zauważyli, że niezbędna zawartość domieszki napowietrzającej w mieszance zawierającej popiół lotny wapienny jest mniejsza niż w mieszance z popiołem lotnym krzemionkowym, chociaż w obu przypadkach wymagane jest zwiększenie dawki domieszki napowietrzającej w porównaniu do mieszanki bez popiołów.

Ważnym spostrzeżeniem jest możliwość szybkiej oceny wpływu dodatku popiołu lotnego wapiennego na napowietrzenie mieszanki za pomocą stosunkowo prostych metod (badanie wskaźnika piany i stabilności piany), chociaż jeszcze nieznormalizowanych.

Stwierdzone negatywne efekty oddziaływania popiołów lotnych wapiennych były zbliżone do oddziaływania fluidalnych popiołów lotnych [7], z tym, że w tym przypadku trudno je jednoznacznie przypisać zawartości niespalonego węgla w popiołach. Wyniki uzyskane podczas badań wskaźnika piany, oprócz ukazania tendencji wzrostu zapotrzebowania na domieszkę napowietrzającą wraz ze wzrostem ilości popiołu wapiennego, uwidoczniły także różnice pojawiające się między popiołami z różnych partii, pobranych w różnych okresach pracy Elektrowni Bełchatów. Wykazały, że głównym czynnikiem charakteryzującym popiół lotny wapienny (przy takim samym składzie mineralnym), jako dodatek do betonów napowietrzanych, jest jego rozdrobnienie. Zwiększenie zapotrzebowania na domieszkę rośnie w przybliżeniu liniowo ze wzrostem powierzchni właściwej według Blaine'a.

Wyniki badania stabilności piany, uzyskane przy zastosowaniu opisanej metody oznaczenia, okazały się mniej uzależnione od właściwości fizycznych stosowanego popiołu lotnego wapiennego niż wyniki oznaczenia wskaźnika piany. Istotne różnice stabilności piany stwierdzono przy wzrastającej zawartości popiołów, niezależnie od ich powierzchni właściwej.

Podobnie jak w niektórych przypadkach wykorzystania popiołów lotnych fluidalnych [4], [7], napowietrzanie mieszanek betonowych z dodatkiem popiołu wapiennego przypadku wymagało przekroczenia limitu dozowanej domieszki napowietrzającej (powyżej 0,9% masy cementu). Wobec tego uzyskanie wyższego napowietrzenia mieszanek betonowych zawierających popiół lotny wapienny wymaga innego zaprojektowania mieszanek.

## 5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski.

- Zawartość powietrza w mieszankach betonowych z dodatkiem popiołów lotnych wapiennych zmniejsza się ze wzrostem powierzchni właściwej popiołów według zależności zbliżonej do liniowej.
- Wraz ze wzrostem ilości dodatku popiołu lotnego wapiennego wzrasta zapotrzebowanie na ilość domieszki napowietrzającej.

- Badania wskaźnika piany i stabilności piany są prostymi i skutecznymi narzędziami do oceny wpływu dodatku popiołu lotnego wapiennego na napowietrzenie mieszanki betonowej.
- Dodatek popiołu lotnego wapiennego, zastępującego od 15% do 30% masy cementu przy  $k=0,4$ , do mieszanki betonowej napowietrzanej powoduje znaczną utratę zawartości powietrza, sięgającą od 25 do 60% początkowej wartości; ucieczka pęcherzyków powietrza dotyczy przede wszystkim porów powietrznych o dużych średnicach.

Praca była współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, nr. projektu; POIG .01.01.02-24-005/09

## Literatura

- [1] A.Garbacik, Z.Giergiczny, M.A.Glinicki, J.Gołaszewski, Założenia Projektu Strukturalnego Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka „Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego”, V Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Energia i środowisko w technologiach materiałów budowlanych, ceramicznych, szklarskich i ogniotrwałych”, Wydawnictwo Instytut Śląski, Warszawa-Opole 2010,173-185
- [2] I. Kulaots, A. Hsu, R.H. Hurt, E.M. Suuberg, Adsorption of surfactants on unburned carbon in fly ash and development of a standardized foam index test, *Cement and Concrete Research*, 33 (2003), 2091–2099,
- [3] P.H. Pedersen, A.D. Jensen, M.S. Skjřth-Rasmussen, K. Dam-Johansen, A review of the interference of carbon containing fly ash with air entrainment in concrete, *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 (2008), 135–154
- [4] M. Zieliński, Właściwości i struktura betonów z dodatkiem popiołów lotnych ze spalania węgla w kotłach fluidalnych, Rozprawa doktorska, IPPT PAN, Warszawa 2005
- [5] S.H. Gebler, P. Klieger, Effect of fly ash on the air void stability of concrete, *Portland Cement Association*, Skokie, IL, 1986, 40 s.
- [6] D.Załocha, J.Kasperkiewicz, Zastosowanie ilościowej analizy obrazu do oceny struktury porów w betonie napowietrzanym, *DROGI i MOSTY*, nr 2/2002, 107-118
- [7] M.A. Glinicki, M.Zieliński, Air void system in concrete containing circulating fluidized bed combustion fly ash, *Materials and Structures*, 41 (2008), 681-687