

Jacek Halbiniak, Bogdan Langier

## MROZODPORNOŚĆ BETONU POPIOŁOWEGO A CHARAKTERYSTYKA PORÓW POWIETRZNYCH

### Wprowadzenie

Obecnie stosowane betony zawierają w swoim składzie oprócz tradycyjnych składników także domieszki i dodatki mineralne. Dodatki do betonu traktuje się jako pełnowartościowe składniki betonu, mające wpływ na poprawę właściwości mieszanki betonowej oraz stwardniałego betonu [1-3]. Zastosowanie popiołów lotnych w technologii betonu w pełni wpisuje się w koncepcję zrównoważonego rozwoju. Pozwala na zmniejszenie zużycia klinkieru cementowego, a to skutkuje zmniejszonym zużyciem naturalnych surowców kopalnych, ograniczeniem emisji dwutlenku węgla i zanieczyszczeń środowiska. Zmniejsza się powierzchnia składowania ubocznych produktów spalania, jakimi są popioły lotne.

Zapewnienie trwałości kompozytów betonowych zawierających w swoim składzie popioły lotne jest zagadnieniem bardzo istotnym. Trwałość rozumiana jest jako zdolność do zachowania wartości cech użytkowych przez co najmniej przewidywany okres użytkowania w warunkach oddziaływań środowiska możliwych do przewidzenia. Częstym powodem kosztownych napraw bywa naruszenie struktury betonu wywołane oddziaływaniem mrozu. Oddziaływanie cyklicznego zamrażania i rozmrażania na beton zostało ujęte w PN-EN 206-1:2003 [4] poprzez klasy ekspozycji XF1-XF4. Trwałość betonu ma zapewnić stosowanie wymagań dotyczących minimalnej klasy wytrzymałości betonu, minimalnej zawartości cementu czy maksymalnego wskaźnika wodno-cementowego. Dodatkowo dla klas ekspozycji XF2-XF4 norma zaleca napowietrzenie mieszanki, tak by osiągnąć minimalną zawartość powietrza na poziomie 4%. Obecna norma oraz jej krajowe uzupełnienie PN-B-06265:2004 [5] nie zawierają wymagań odnoszących się do struktury porowatości betonu napowietrzanego. Jednak powszechny jest pogląd, że uzyskanie odpowiedniej mrozo- odporności wiąże się z właściwym rozmieszczeniem pęcherzyków powietrza. Uzasadnieniem tego są np. unormowania przyjęte w Austrii i Danii [6, 7], w których rozmieszczenie porów charakteryzowane jest poprzez maksymalną odległość między porami i minimalną zawartość powietrza lub minimalną zawartość porów o średnicy mniejszej niż 300  $\mu\text{m}$ .

## 1. Zasady stosowania popiołów lotnych jako dodatku do betonu

### 1.1. Klasyfikacja popiołów lotnych

Nazwę popioły lotne stosuje się do całej grupy ubocznych produktów spalania (UPS). Popioły stosowane w technologii betonu jako dodatek typu II, tzn. materiał drobnoziarnisty, nieorganiczny o właściwościach pucolanowych, muszą spełniać wymagania aktualnej normy PN-EN 450-1:2012 [8]. W normie zdefiniowano popiół jako „drobno uziarniony pył, składający się głównie z kulistych, zeszkliwionych ziaren, otrzymany przy spalaniu pyłu węglowego, przy udziale lub bez udziału materiałów współspalanych, mający właściwości pucolanowe, zawierający w swoim składzie przede wszystkim  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ”. Pozyskiwany jest przez elektrostatyczne lub mechaniczne oddzielenie cząstek pylistych z gazów wylotowych elektrowni. Wprowadzono podział popiołów na dwa rodzaje:

- V - popiół lotny krzemionkowy,
- W - popiół lotny wapienny.

TABELA 1

Wymagania dla składu chemicznego popiołów lotnych [8]

Składnik	Dopuszczalna zawartość	
	Popiół otrzymywany wyłącznie przez spalanie pyłu węglowego	Popiół otrzymywany wyłącznie przez współspalanie
Straty prażenia: Kategoria A	$\leq 5,0\%$	
Kategoria B	$2,0\div 7,0\%$	
Kategoria C	$4,0\div 9,0\%$	
Chlorki	$\leq 0,10\%$	
$\text{SO}_3$	$\leq 3,0\%$	
CaO wolny	$\leq 2,5\%^{1)}$	
CaO reaktywny	$\leq 10,0\%$	
$\text{SiO}_2$ reaktywny	określenie zawartości nie jest konieczne, należy przyjąć, że wymaganie jest spełnione	$\geq 25,0\%$
Sumaryczna zawartość tlenków: $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$		$\geq 70,0\%$
Zawartość MgO		$\leq 4,0\%$
Całkowita zawartość alkaliów w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$		$\leq 5,0\%$
Zawartość rozpuszczalnych związków fosforu w przeliczeniu na $\text{P}_2\text{O}_5$		$\leq 100 \text{ mg/kg}$

<sup>1)</sup> Popiół lotny, w którym zawartość wolnego CaO jest większa niż 1,0% masy, lecz nie większa niż 2,5%, może być akceptowany pod warunkiem zachowania stałości objętości - próba Le Chateliera  $\leq 10 \text{ mm}$

W zależności od zawartości strat prażenia podzielono popioły na 3 kategorie: A, B lub C (tab. 1). Druga klasyfikacja popiołu dotyczy jego mialkości (tab. 2) i wprowadza kategorie N i S.

TABELA 2

**Wymagania właściwości fizycznych popiołów lotnych [8]**

Właściwość		Wymagania
Mialkość, pozostałość na sicie o oczkach 0,045 mm przy przesiewaniu na mokro wg PN-EN 451-2		
Kategoria N		≤ 40%
Kategoria S		≤ 12%
Wskaźnik aktywności pucolanowej:	po 28 dniach	≥ 75%
	po 90 dniach	≥ 85%
Stałość objętości (badanie jest konieczne, gdy zawartość CaO <sub>wolny</sub> zawiera się pomiędzy 1,0 a 2,5%)		≤ 10 mm
Gęstość objętościowa		Maksymalna różnica ± 200 kg/m <sup>3</sup> w stosunku do wartości zadeklarowanej przez producenta
Początek czasu wiązania zaczynu zawierającego 25% popiołu i 75% cementu portlandzkiego CEM I		Nie dłuższy niż 2-krotność czasu wiązania użytego cementu CEM I
Wodożądność (dotyczy popiołu o mialkości w kategorii S)		≤ 95% wodożądności użytego cementu portlandzkiego CEM I

## 1.2. Wpływ popiołu na właściwości betonów

Popiół lotny może mieć zastosowanie w betonach jako zamiennik cementu, ale także jako mikrokruszywo. Podstawowe oddziaływanie popiołu związane jest z właściwościami mieszanki betonowej i dotyczy wodożądności i urabialności. Popiół wpływa w korzystny sposób na urabialność mieszanki betonowej, działa uplastyczniająco, powoduje poprawienie spoiwości i zapobiega jej segregacji. Lepsza urabialność mieszanki betonowej związana jest ze sferycznym kształtem ziaren popiołu, co określane jest mianem „efektu kulek łożyskowych”. Popioły lotne w istotny sposób wpływają na poprawę szczelności mieszanki betonowej. W zależności od właściwości, jakie posiadają, oraz od składu fazowego mogą zmniejszyć, jak też zwiększyć zapotrzebowanie na wodę. Szczególnie związane to jest z zawartością niespalonego węgla (cząstek koksu) w składzie popiołu [1, 9, 10]. Również skład ziarnowy popiołów bywa często zróżnicowany, co przekłada się, podobnie jak zawartość niespalonego koksiku, na duży wpływ na wodożądność. Oceny ilości niespalonego węgla w składzie popiołu dokonuje się poprzez badanie strat prażenia. Popioły lotne o niskich stratach prażenia posiadają bardziej kulisty kształt ziaren, dzięki czemu poprawiają urabialność mieszanki betonowej. Wysoka ilość niespalonego węgla (wysokie straty prażenia) w popiele powoduje, że jest on gruboziarnisty o ziarnach z rozwiniętą powierzchnią właściwą, a to skutkuje zwiększeniem wodożądności. Obecność ziaren o dużej porowatości i rozwiniętej po-

wierzchni skutkuje również słabszym oddziaływaniem domieszek chemicznych [9]. Powoduje to, że mieszanka betonowa wymaga większej ilości wody zarobowej.

Popiół lotny modyfikuje nie tylko właściwości mieszanki betonowej, ale również znacząco wpływa na właściwości stwardniałego betonu. Istotną rolę w oddziaływaniu na wytrzymałość na ściskanie betonu odgrywa kategoria popiołu ze względu na straty prażenia oraz jego stopień miakkości. Badania przeprowadzone przez Giergicznego i Gawlickiego [11] potwierdzają korzystny wpływ pyłu o większej miakkości (tab. 3).

TABELA 3

### Wytrzymałość na ściskanie spoiw cementowo-popiołowych [11]

Rodzaj spoiwa	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	
	Po 2 dniach	Po 28 dniach
Cement CEM I 32,5R	25,1	53,4
Cement CEM I 32,5R (80%) z dodatkiem popiołu o pozostałości na sicie 0,045 mm - 3,7% (20%)	22,0	51,9
Cement CEM I 32,5R (80%) z dodatkiem popiołu o pozostałości na sicie 0,045 mm - 40,3% (20%)	18,5	43,6

Wyższe straty prażenia popiołu wpływają na niższą trwałość betonu. Szczególnie gdy znaczna część cementu zostanie zastąpiona popiołem lotnym, może to wpłynąć na zmniejszoną odporność mrozową. Wpływ popiołu na strukturę betonu i jego cechy, takie jak mrozoodporność, nasiąkliwość czy wytrzymałość na ściskanie, są przedmiotem wielu badań [11, 12]. Poglądy na wpływ popiołu na mrozoodporność betonu, szczególnie popiołów o dużych stratach prażenia, nie zawsze są zbieżne [9, 11], a to wymaga kontynuowania badań mających na celu ocenę trwałości kompozytów cementowych z dodatkiem popiołu o różnych zawartościach strat prażenia. Obecność niespalonego węgla w popiołach wpływa na trudności z odpowiednim napowietzeniem.

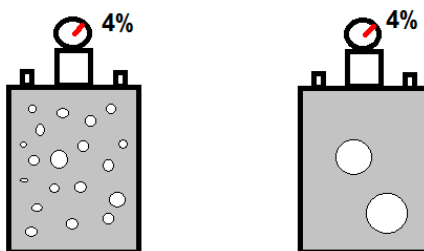
### 1.3. Istota i badanie napowietrzania

Nie ma betonów niezawierających pustek powietrznych i nawet staranne zagęszczenie pozostawia około 1÷2% powietrza. Charakter pustek w betonie jest różny i może mieć postać:

- wolnych miejsc (pustek) po zagęszczaniu,
- kapilarów otwartych i zamkniętych,
- pustek żelowych,
- powietrza sztucznie wprowadzonego.

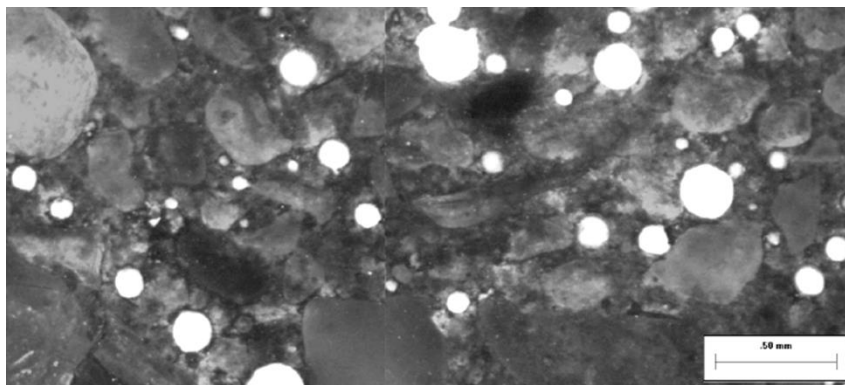
Napowietrzanie mieszanki betonowej jest zabiegiem mającym na celu uzyskanie betonu mrozoodpornego. Technologia ta jest stosowana już od wielu dziesiątków

lat, jednak wymaga dużych umiejętności podczas produkcji, jak również układania betonu, aby beton uzyskał określoną strukturę porów powietrznych.



Rys. 1. Rozmieszczenie pęcherzyków powietrza w betonie

Równomiernie rozłożone, drobne, kuliste pęcherzyki powietrza mają za zadanie przerywać sieć porów kapilarnych, będących drogą transportu cieczy w betonie. Ponieważ pęcherzyki te nie mają tendencji do nasycania się wodą, to stają się niejako buforem dla zwiększającej swoją objętość wody podczas zamrażania. Odpowiednie napowietrzenie betonu można osiągnąć, dobierając odpowiednią ilość domieszki napowietrzającej. Poziom jej dozowania określany jest przez producenta. Jednak ilość domieszki napowietrzającej dla uzyskania odpowiedniego napowietrzenia uzależniona jest od rodzaju zastosowanego cementu, uziarnienia kruszywa, użytych dodatków i domieszek, urabialności mieszanki betonowej czy nawet temperatury betonu. Charakterystyka napowietrzenia opisana przez krytyczną odległość  $\bar{L}$  zależy od ilości użytej domieszki napowietrzającej, a wartość krytyczna  $\bar{L}$  może być różna dla różnych betonów [13, 14]. Dlatego w praktyce budowlanej trudno jest uzyskać powtarzalną strukturę porów, charakteryzowaną całkowitą ich obecnością czy średnicą porów [15].



Rys. 2. Powierzchnia zglądu przygotowana do badań [16]

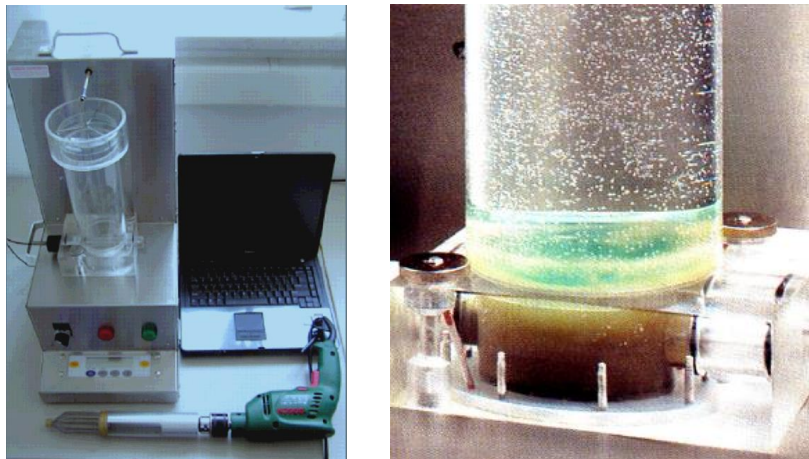
Oznaczanie charakterystyki porowatości stwardniałego betonu wykonuje się zgodnie z normą PN-EN 480-11:2008 [17]. Badanie polega na obserwacji porów

na odpowiednio przygotowanych zgładach betonowych i wyznaczeniu parametrów opisujących ich ilość, wielkość i rozmieszczenie:

- $\bar{L}$  - wskaźnik rozmieszczenia porów,
- $\alpha$  - powierzchnia właściwa porów,
- A - całkowita zawartość powietrza,
- $A_{300}$  - zawartość mikroporów o  $\varnothing$  do 300  $\mu\text{m}$ .

Charakterystykę porowatości mieszanki betonowej można wykonać także za pomocą urządzenia Air Void Analyzer (rys. 3). Badanie w urządzeniu AVA umożliwia kontrolę charakterystyki powietrza już w świeżej mieszance betonowej, określenie struktury porów i rozmieszczenie w matrycy cementowej. Aparat AVA pozwala na pomiar 4 parametrów (zgodnie z ASTM C457):

- całkowitą zawartość powietrza (A),
- rozstaw porów ( $\bar{L}$ ),
- powierzchnię właściwą ( $\alpha$ ),
- zawartość pęcherzyków o średnicy do 300  $\mu\text{m}$  ( $A_{300}$ ).



Rys. 3. Aparat Air Void Analyzer (AVA) [18]

## 2. Badania własne

Badania miały na celu określenie wpływu popiołu lotnego na jakościowe parametry betonu i skuteczność napowietrzenia mieszanki betonowej. Do wykonania betonów zastosowano składniki: kruszywo naturalne o uziarnieniu do 16 mm i punkcie piaskowym PP = 35%; cement CEM I 42,5R, popiół lotny krzemionkowy oraz domieszkę upłynniającą na bazie polikarboksylanów. Zaprojektowany beton kontrolny (seria A) zmodyfikowano w serii F poprzez wprowadzenie popiołu lotnego w maksymalnej dopuszczalnej normowo ilości. W betonach serii F; G; H wprowadzono dodatkowo domieszkę napowietrzającą w ilości odpowiednio 0,2; 0,5 i 0,8% masy cementu. Składy badanych betonów przedstawiono w tabeli 4.

Dla wszystkich serii betonów wykonano badania: zawartości powietrza w mieszance betonowej, konsystencji metodą opadu stożka, wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, głębokości penetracji wody, odporności na 150 cykli zamrożeń i rozmrożeń oraz struktury porowatości poprzez wyznaczenie: całkowitej zawartości powietrza w stwardniałym betonie  $A$ , wskaźnika rozmieszczenia porów  $\bar{L}$ , zawartości mikroporów  $A_{300}$  oraz rozkładu porów powietrznych.

Badania betonu przeprowadzono na próbkach sześciennych o krawędzi 150 mm, które były rozformowane po 24 godzinach od ich przygotowania, a następnie przechowywane przez kolejne 27 dni w wodzie o temperaturze 20°C.

TABELA 4

Składy badanych serii betonów

Składniki [kg/m <sup>3</sup> ]	Seria				
	A	E	F	G	H
Cement	383	338,3	338,3	338,3	338,3
Woda	191,5	191,5	191,5	191,5	191,5
Kruszywo	1820	1724	1724	1724	1724
Popiół lotny	–	111,6	111,6	111,6	111,6
Superplastyfikator	6,894	6,894	6,894	6,894	6,894
Domieszka napowietrzająca	–	–	0,675	1,69	2,7

Badane mieszanki betonowe mieszano w betoniarce o wymuszonym mieszananiu przez 70 sekund, po czym przeprowadzono oznaczenia: konsystencji metodą opadu stożka oraz zawartości powietrza metodą ciśnieniową. Wyniki oznaczeń zestawiono w tabeli 5.

TABELA 5

Wyniki badań mieszanek betonowych

Badana cecha	Seria				
	A	E	F	G	H
Opad stożka [mm]	45	108	160	190	195
Klasa konsystencji S	S2	S3	S4	S4	S4
Zawartość powietrza [%]	2,3	2,35	2,85	4,6	5,35

Zawartość powietrza w mieszance betonowej serii kontrolnej wyniosła 2,3%. Zastąpienie cementu maksymalną dopuszczalną dawką popiołu lotnego w serii E nie spowodowało wzrostu stopnia napowietrzenia. W seriach z dodatkiem domieszki napowietrzającej wraz ze zwiększaniem dawki odnotowywano zwiększanie zawartości powietrza odpowiednio: w serii F - 2,85%, w serii G - 4,6% oraz w serii H - 5,35%.

### 2.1. Wyniki badań wybranych cech betonu

Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania próbek. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 6.

TABELA 6

Średnie wytrzymałości na ściskanie badanych betonów

Badana cecha	Seria				
	A	E	F	G	H
Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{cm}$ [MPa]	53,1	50,2	49,1	46,3	43,3
Klasa wytrzymałościowa	C35/45	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37

Beton serii kontrolnej A o średniej wytrzymałości na ściskanie  $f_{cm} = 53,1$  MPa został zakwalifikowany do klasy wytrzymałościowej C35/45. Zastąpienie cementu popiołem lotnym (seria E) spowodowało spadek średniej wytrzymałości do  $f_{cm} = 50,2$  MPa, co nie wpłynęło na zmianę klasy betonu. Średnia wytrzymałość betonu serii F z najmniejszą ilością domieszki napowietrzającej (F) wyniosła  $f_{cm} = 49,1$  MPa, co pozwoliło także zaliczyć ją do klasy C35/45. W betonie serii G, w którym dodano większą ilość domieszki napowietrzającej, w ilości 0,5% masy cementu, uzyskano wytrzymałość na ściskanie  $f_{cm} = 46,3$  MPa. W betonie serii H, w którym zastosowano największą dawkę domieszki napowietrzającej, w ilości 0,8% masy cementu, uzyskano dalszy spadek średniej wytrzymałości na ściskanie do wartości  $f_{cm} = 43,3$  MPa. Obie serie (G i H) zostały zaliczone do klasy C30/37.

Badania głębokości penetracji wody przeprowadzono w oparciu o normę PN-EN 12390-8. Badania mrozoodporności dla 150 cykli zamrożeń przeprowadzono w oparciu o normę PN-88/B-06250 [19]. Wyniki badań zestawiono w tabeli 7.

TABELA 7

Wyniki badań głębokości penetracji wody i mrozoodporności dla 150 cykli

Badana cecha	Seria betonu				
	A	E	F	G	H
Głębokość penetracji wody [mm]	68	54	48	40	40
Mrozoodporność 150 cykli	Ubytek masy [%]	0	0	0	0
	Spadek wytrzymałości na ściskanie [%]	40	34	39	14

W betonie kontrolnym uzyskano wartość głębokości penetracji wody równą 68 mm. Zastąpienie cementu maksymalną dopuszczalną dawką popiołu lotnego wpłynęło na niewielkie uszczelnienie matrycy cementowej badanego betonu, co skutkowało zmniejszeniem głębokości penetracji wody do 54 mm. W serii F, w której zastoso-



wano domieszkę napowietrzającą w ilości 0,2% masy cementu, uzyskano porównywalną wartość głębokości penetracji wody równą 39 mm. W betonach serii G i H, w których zastosowano domieszkę napowietrzającą odpowiednio w ilości 0,5 i 0,8% masy cementu, otrzymano zdecydowanie niższą wartość penetracji wodą, która wyniosła 14 i 15 mm.

W badaniu mrozoodporności spadek wytrzymałości na ściskanie po 150 cyklach betonu kontrolnego wyniósł aż 40%. Oznacza to, że beton kontrolny nie posiadał odporności w zakresie 150 cykli zamrożeń i rozmrożeń. Dodatek popiołu lotnego w betonie serii E spowodował zwiększenie odporności betonu na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Spadek wytrzymałości na ściskanie dla betonu serii E po 150 cyklach wyniósł 34%, jednak nie spowodował uznania go za mrozoodporny. Beton z dodatkiem najmniejszej ilości domieszki napowietrzającej (seria F) także uzyskał niezadowalające wyniki mrozoodporności. Obie serie betonów (G i H) z dodatkiem większej ilości domieszki napowietrzającej uzyskały spadek wytrzymałości poniżej 20%. Zgodnie z normą PN-88/B-06250 [19], maksymalny spadek wytrzymałości nie może przekroczyć 20%. Oznacza to, że betony serii G i H uzyskały odporność w zakresie 150 cykli zamrożeń i rozmrożeń.

## 2.2. Wyniki badań charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie

Przygotowanie próbek do badań oraz metodyka badawcza oznaczenia charakterystyki porów powietrznych w betonie zostały wykonane zgodnie z procedurą wg normy PN-EN 480-11:2008 [17]. Badanie przeprowadzono za pomocą automatycznego systemu do analizy obrazu porów powietrznych w betonie oraz programu komputerowego Lucia Concrete. Dla wszystkich badanych serii betonów określono następujące parametry charakteryzujące strukturę betonów: całkowitą zawartość powietrza w betonie A, wskaźnik rozmieszczenia porów  $\bar{L}$ , zawartość mikroporów  $A_{300}$  (klasa 18). Uzyskane wyniki badań przedstawiono w tabeli 8.

TABELA 8

### Wyniki badań charakterystyki porów powietrznych

Badana cecha	Seria				
	A	E	F	G	H
Całkowita zawartość powietrza w betonie A [%]	3,3	3,2	3,3	3,9	4,0
Wskaźnik rozmieszczenia porów $\bar{L}$ [mm]	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2
Zawartość mikroporów $A_{300}$ [%]	2,0	1,0	2,1	2,0	1,9

Zastąpienie cementu popiołem lotnym wpłynęło na zmniejszenie ilości porów klasy 18 z 2 do 1%. Zastosowanie domieszki napowietrzającej w najmniejszej dawce (F) nie wpłynęło na zwiększenie w istotny sposób całkowitej zawartości powietrza, natomiast zmienił się na niekorzyść wskaźnik rozmieszczenia porów, osiągając war-

tość 0,4 mm. Dopiero poprzez zastosowanie większej ilości domieszki napowietrzającej (serie G, H) osiągnięto parametry charakterystyki porów powietrznych wymagane dla betonów poprawnie napowietrzonych.

### Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały:

- Beton nienapowietrzony (A, E) oraz ze zbyt małą ilością domieszki napowietrzającej (F) pomimo wysokiej wytrzymałości na ściskanie wykazuje brak odporności na zamrażanie.
- Domieszka napowietrzająca istotnie wpływa na wytrzymałość na ściskanie, powodując jej spadek.
- Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że możliwe jest zapewnienie dobrej odporności na mróz betonów zawierających popiół lotny.
- Zawartość powietrza około 4% zapewnia poprawę mrozoodporności również w przypadku zastosowania popiołu.
- Warunkiem mrozoodporności jest zapewnienie właściwej struktury porów powietrznych.

### Literatura

- [1] Giergiczny Z., Popiół lotny w składzie cementu i betonu, Monografia, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [2] Sear L.K.A., Properties and Use of Coal Fly Ash. A Valuable Industrial By-product, Thomas Telford Ltd, London, 2001.
- [3] Małolepszy J., Tkaczewska E., Wpływ uziarnienia krzemionkowych popiołów lotnych na proces hydratacji i właściwości cementu, Cement Wapno Beton 2007, 6.
- [4] PN-EN 206-1:2003. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [5] PN-B-06265:2004. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206-1 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [6] ÖNORM B 4710-1:2002. Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1).
- [7] DS 2426:2004. Beton - Materialer - Regler for anvendelse af EN 206-1, Danmark.
- [8] PN-EN 450-1:2012. Popiół lotny do betonu. Definicje, wymagania i kontrola jakości.
- [9] Giergiczny Z., Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych, Seria: Inżynieria Lądowa, Monografia 325, Politechnika Krakowska, Kraków 2006.
- [10] Siddique R., Waste Materials and By-Product in Concrete, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg 2008.
- [11] Giergiczny Z., Gawlicki M., Popiół lotny jako aktywny składnik cementów i dodatek mineralny do betonu, Materiały konferencyjne, Polski Cement, Dni Betonu 2004.
- [12] Wawrzeniuk J., Wpływ dodatku popiołu lotnego na mrozoodporność betonu, Materiały konferencyjne, Polski Cement, Dni Betonu 2002.
- [13] Łązniewska B., Teoretyczna praktyczna wartość parametrów struktury porowatości mrozoodpornego SCC, Krynica 2007.

- [14] Szwabowski J.Z., Łaźniewska-Piekarczyk B., Znaczenie parametrów struktury porowatości samozagęszczalnego betonu odpornego na mróz, *Cement Wapno Beton* 2008, 3.
- [15] Du L., Folliard K.J., Mechanisms of air entrainment in concrete, *Cement and Concrete Research* 2005, 35.
- [16] Glinicki M.A., Metody ilościowej i jakościowej oceny napowietrzenia betonu, II Symposium Naukowo-Techniczne „Trwałość betonu”, Góraźdże Cement, Kraków 2008.
- [17] PN-EN 480-11:2008. Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu - Metody badań - Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.
- [18] Grzesiak K., Gemel P., Mrozoodporność a jakość napowietrzenia - metoda badania struktury porów powietrznych w świeżej mieszance betonowej, VIII Symposium Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Politechnika Śląska i Góraźdże Cement, Gliwice 2006.
- [19] PN-88/B-06250. Beton zwykły.

### Streszczenie

W artykule przedstawiono ocenę wpływu popiołów lotnych na charakterystykę porów powietrznych i mrozoodporność betonu. Ocenie poddano takie cechy, jak: zawartość powietrza badana metodą ciśnieniową, wytrzymałość na ściskanie, głębokość penetracji wodą pod ciśnieniem, mrozoodporność przy 150 cyklach oraz charakterystykę porów powietrznych. Oznaczono parametry charakteryzujące strukturę porowatości: całkowitą zawartość powietrza w betonie A, wskaźnik rozmieszczenia porów  $\bar{L}$ , zawartość mikroporów  $A_{300}$ .

### Frost resistance of concrete ash and characterization of air voids

#### Abstract

The paper presents the influence of fly ashes for the parameters which define the characteristics of the air pores and frost resistance of aerated concrete. Tests of concrete mix have been performed, such as the slump cone consistency and air content with pressure method used. Compressive strength, the depth of water penetration under pressure, frost resistance at 150 cycles and the characteristics of air pores have been evaluated for concrete. Parameters characterizing the pore structure have been marked: the total air content in concrete A, the ratio of pores location  $\bar{L}$ , the content of micropores  $A_{300}$ .