

# Wpływ wybranych zabiegów technologicznych na skuteczność napowietrzania betonów

Dr inż. Janusz Konkol, mgr inż. Kamila Pleban, Politechnika Rzeszowska

## 1. Wprowadzenie

Zastosowanie domieszek napowietrzających jest praktykowane w budownictwie od ponad dwudziestu lat. Jednak jakość napowietrzania jest nadal daleka od ideału. W typowych procesach napowietrzania często występują w nadmiarze niepożądane pory o wielkościach przekraczających  $60 \mu\text{m}$ , co skutkuje wzrostem porowatości betonu i obniżeniem jego wytrzymałości. Wiadomo również [1, 2], że końcowa jakość napowietrzania jest wypadkową zastosowanych materiałów, technologii wykonania oraz warunków wykonania. Wśród czynników technologicznych należy wymienić: rodzaj mieszarki, czas mieszania, czynniki temperaturowe, sposób układania i zagęszczania. Na przykład czas mieszania powinien być optymalny. Powinien być dłuższy niż czas potrzebny do wymieszania wszystkich składników mieszanki betonowej, jednak zbyt długi może prowadzić do pogorszenia skuteczności napowietrzania.

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu wybranych czynników technologicznych na końcową skuteczność napowietrzania betonów. Przeprowadzono analizę wpływu zmiennej kolejności dozowania składników mieszanki betonowej, wydłużenia czasu mieszania czy zmiany wilgotności kruszywa.

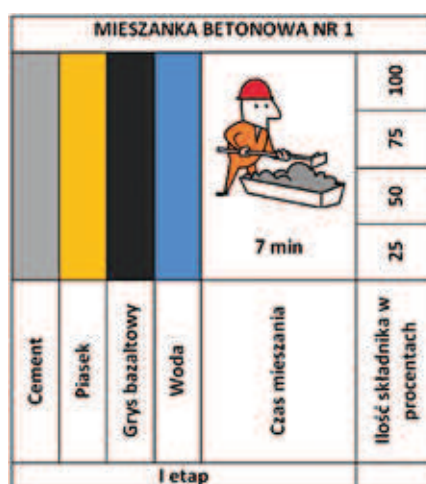
## 2. Program badań i zastosowane materiały

Zaprojektowano i sporządzono 5 mieszanek betonowych. Do ich wykonania zastosowano cement CEM I 32,5R z cementowni Ożarów S.A., piasek z miejscowości Strzegocice oraz grys bazaltowy frakcji do 16 mm z miejscowości Wilków. Przyjęto stały stosunek wodno-cementowy wynoszący 0,45. Wstępnie ustalono skład mieszanki podstawowej (mieszanka betonowa nr 1) zawierającej 476,5 kg cementu, 214,5 l wody, 639,4 kg piasku i 1195,1 kg grysu bazaltowego. Do pozostałych czterech mieszanek betonowych dodano domieszkę napowietrza-

jącą MISCHÖL LP 70 (LP) w stałej ilości 0,8% masy cementu. Według danych producenta, domieszka napowietrzająca MISCHÖL LP 70 (LP) nie ma wpływu na przebieg wiązania cementu, poprawia jednorodność betonu oraz powoduje uzyskanie pożądanych parametrów współczynnika dystansu i zawartości mikroporów powietrznych. Surowcem podstawowym domieszki jest mydło żywic naturalnych. Dawkowanie według producenta wynosi od 0,05 do 1,6% w stosunku do masy cementu. W recepturach roboczych uwzględniono wilgotność naturalną kruszyw wynoszącą odpowiednio 2,04% dla piasku i 0,64% w przypadku grysu bazaltowego.

Zmiennymi w badaniach były: kolejność dozowania składników, czas mieszania składników oraz wilgotność kruszywa grubego.

Mieszankę betonową nr 1 (rys. 1) wykonano przez jednoczesne wymieszanie wszystkich składników w mieszarce. Czas mieszania wynosił 7 minut.

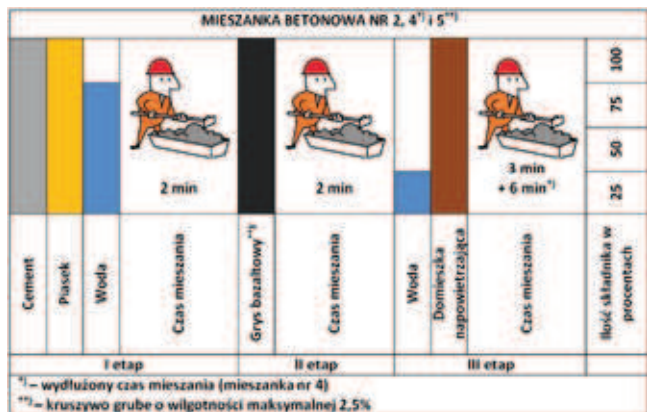


**Rys. 1.**  
Schemat wykonania mieszanki betonowej nr 1

Mieszanka betonowa nr 1 nie zawierała środka napowietrzającego.

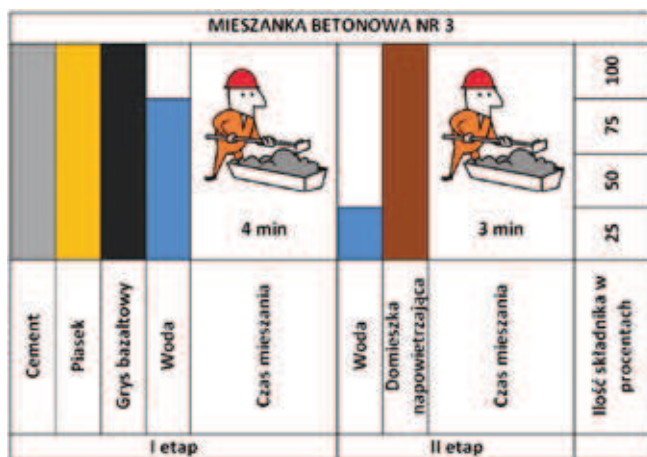
Mieszankę betonową nr 2 (rys. 2) wykonano przez zmieszanie cementu, piasku i  $\frac{3}{4}$  ilości wody. Składniki mieszano przez 2 minuty, a następnie

dołączono kruszywo grube o wilgotności naturalnej 0,64% i ponownie mieszano przez 2 minuty. W III etapie dodano środek napowietrzający wraz z pozostałą ilością wody (1/4 wody) i ponownie mieszano przez 3 minuty.



Rys. 2. Schemat wykonania mieszanki betonowych nr 2, 4 i 5

Mieszankę betonową nr 3 (rys. 3) wykonano przez zmieszanie cementu, piasku, kruszywa grubego o wilgotności naturalnej i 3/4 ilości wody. Czas mieszania w I etapie trwał 4 minuty. Następnie dodano środek napowietrzający z pozostałą ilością wody (1/4 wody) i ponownie mieszano przez 3 minuty.



Rys. 3. Schemat wykonania mieszanki betonowej nr 3

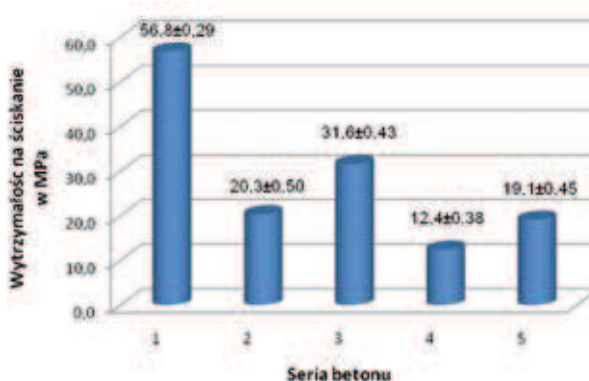
W przypadku mieszanki betonowej nr 4 (rys. 2) wydłużono, w stosunku do mieszanki nr 2, czas mieszania składników w III etapie z 3 do 9 minut. Do wykonania mieszanki betonowej nr 5 (rys. 2) zastosowano natomiast kruszywo grube nasączone wodą o wilgotności 2,5% (czas nasączania 24 godziny). Wszystkie czynności wykonano, jak w przypadku mieszanki betonowej nr 2 (czas mieszania w III etapie trwał 3 minuty). W przypadku mieszanki betonowej z kruszywem o wilgotności 2,5%, ilość wody zarobowej pomniejszono o wodę wprowadzoną wraz z kruszywem.

### 3. Badania konsystencji mieszanki betonowej i wytrzymałości na ściskanie betonu

W przypadku wszystkich mieszanek betonowych uzyskano stopień konsystencji według metody stolika rozpląwowego F3 (tabela 1). Różnica w średnim rozpląwie placka wyniosła maksymalnie 4 cm. Brak znacznego zróżnicowania konsystencji mieszanki betonowej jest istotny z uwagi na potwierdzony, między innymi, w badaniach [1] wpływ tego czynnika na skuteczność napowietrzania.

Tabela 1. Wyniki badania konsystencji mieszanki betonowej metodą rozpląwu

Mieszanka betonowa	Średnica rozpląwu, cm	Stopień konsystencji według metody rozpląwu
1	44	F3
2	44	F3
3	48	F3
4	48	F3
5	45	F3



Rys. 4. Wykres zmienności wytrzymałości na ściskanie betonów w zależności od sposobu wykonania mieszanki betonowej

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na 7 próbkach sześciennych o boku 10 cm. Uzyskane wartości średnie wraz z podaniem błędu standardowego przedstawiono na rysunku 4. Wykazano jednorodności wariancji wytrzymałości na ściskanie za pomocą testu Browna-Forsythe'a, przy użyciu programu STATISTICA. Uzyskano wartość komputerowego poziomu istotności p wynoszącą 0,79, większą od przyjętego poziomu istotności 0,05. Sprawdzone także wpływ wielkości wejściowych (zmiennych w planie badań, tj. zastosowanych zabiegów technologicznych przy wykonaniu mieszanek betonowych) na zmienną wyjściową (wytrzymałość betonu na ściskanie  $f_c$ ). Analizę wykonano za pomocą testu Snedecora (Fishera), który jest jednocześnie testem na równość średnich. Wykazano wysoce istotny wpływ zmiennych niezależnych na wytrzymałość na ściskanie betonów (komputerowy poziom istotności  $p < 0,05$ ).

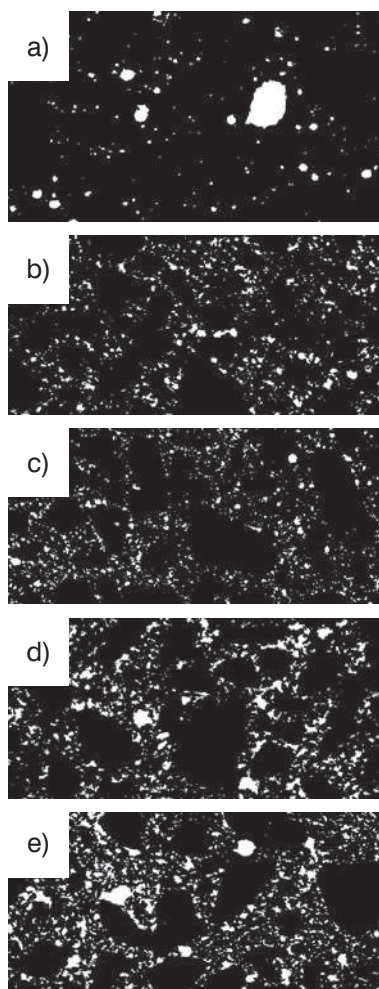
Najlepszym pod względem wytrzymałości na ściskanie był beton serii 1 bez domieszki napowietrzającej. Największy spadek wytrzymałości na ściskanie  $f_c$ , w stosunku do betonu bez domieszki napowietrzającej, miał beton wykonany z mieszanki betonowej nr 4, której czas mieszania wydłużono w ostatnim etapie z 3 do 9 minut (spadek o 44,4 MPa, czyli o ponad 78%).

Zastosowanie kruszywa grubego o zwiększonej wilgotności (kruszywo bazaltowe przetrzymywano przez 24 godziny w wodzie) nie wpłynęło znacząco na zmianę wytrzymałości na ściskanie. W przypadku zastosowania takiego kruszywa, zaobserwowano spadek wytrzymałości na ściskanie o 37,7 MPa, czyli o ponad 66% i jest on porównywalny z betonem serii 2, w przypadku którego użyto kruszywa o naturalnej wilgotności.

Najmniejszy spadek wytrzymałości na ściskanie miał beton serii 3 (spadek o ponad 44%) wykonany dwuetapowo.

#### 4. Określenie charakterystyk porów w stwardniałym betonie na podstawie badań stereologicznych

Porowatość betonu badano na zglądach uzyskanych przez przecięcie próbek betonowych piłą diamentową. Do badań użyto próbek o przekroju  $150 \times 150$  mm. Na jednym zglądzie wydzielono po 4 jednostkowe pola poddawane analizie. Betonowe powierzchnie wyszlifowano, a następnie próbki odpowiednio spreparowano wykorzystując materiał kontrastujący. Zastosowany sposób przygotowania zglądów opisano w pracach [3, 4]. Analiza porów powietrznych została przeprowadzona za pomocą skanera przy rozdzielczości 400 dpi. Obliczeń parametrów stereologicznych dokonano za pomocą autorskiego programu FRAKTAL\_Stereolog. Obrazy powierzchni próbek poddanych analizie stereologicznej przedstawiono na rysunkach



**Rys. 5.**  
Przygotowane do analizy stereologicznej obrazy powierzchni próbek betonowych wykonanych z mieszanek serii: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 i e) 5

4a – e. Obliczenia przeprowadzono, przyjmując dla porów zakres skali szarości od 210 do 255 (0 – czarny, 255 – biały) oraz poddając analizie po 4 obrazy, dla każdej serii betonów. Uzyskane wartości średnie parametrów stereologicznych zestawiono w tabeli 2. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że objętość względna porów w stwardniałym betonie

**Tabela 2.** Charakterystyki porów powietrznych określone na podstawie badań stereologicznych

Seria betonu	Parametry stereologiczne				
	Powierzchnia względna porów AA, % (udział porów poniżej $300 \mu\text{m}$ , A300)	Powierzchnia właściwa porów powietrznych $\alpha$ ,	Współczynnik rozmieszczenia porów $\bar{L}$	Średnia cięciwa porów $\bar{1}$	Średnia odległość między środkami porów $\eta$
	[%]	[1/mm]	[mm]	[cm]	[cm]
1	3,03	6,99	1,02	0,058	1,98
2	8,75	10,26	0,40	0,039	0,46
3	7,54	12,06	0,38	0,033	0,36
4	9,79	9,43	0,399	0,043	0,45
5	11,58	8,96	0,36	0,038	0,38
P	3,15(0,23)	7,77	0,85	0,052	–
M	2,98(0,22)	7,19	0,94	0,056	–
F	3,17(0,26)	8,06	0,81	0,050	–

bez dodatku środka napowietrzającego wyniosła 3% (tabela 2). Na skutek dodania domieszki napowietrzającej, ilość porów powietrznych w betonie zwiększyła się od 7,5 do nawet 11,6%. Największą zawartością porów powietrznych charakteryzował się beton serii 5 (objętość względna porów = powierzchni względnej porów AA wyniosła 11,6%). W tym przypadku na wzrost zawartości porów powietrznych miała wpływ zwiększona wilgotność kruszywa grubego. Jak zauważono na obrazach powierzchni betonów (rys. 5e) większa porowatość betonu wynikała z tworzenia się większych porów technologicznych oraz dużych porów na styku kruszywo wilgotne/zaczyn cementowy. Najmniejszą porowatość miał natomiast beton serii 3 (rys. 5c). W przypadku tego betonu, stwierdzono brak dużych porów technologicznych oraz porów na styku kruszywo/zaczyn cementowy. Beton serii 3 miał o 4% mniejszą porowatość niż beton serii 5. Należy zatem stwierdzić, że zastosowanie kruszywa o podwyższonej wilgotności niekorzystnie wpływa na skuteczność napowietrzania betonów. Niekorzystny wpływ kruszywa grubego o zwiększonej wilgotności potwierdzają również wyniki (tabela 2) i obrazy (rys. 5b) uzyskane dla betonu serii 2, betonu również wykonanego na kruszywie o naturalnej wilgotności, w przypadku którego nie stwierdzono występowania porów na styku kruszywo/zaczyn cementowy. Wielkość i rozmieszczenie porów w betonie, w którym zastosowano kruszywo grube o zwiększonej wilgotności (serii 5) wpływa negatywnie na wytrzymałość betonu, jak również będzie skutkowało brakiem mrozoodporność tego betonu. Podobne badania przeprowadzone przez Rusina [1] wykazały, że betony wykonane na kruszywie przez 24 godziny nasączone wodą miały najgorszą mrozoodporność. Woda zawarta w kruszywie wpływa zatem ujemnie na trwałość betonu poddanego działu cyklicznego zamrażania/rozmarzania. Analiza wyników badań stereologicznych (tabela 2) oraz analiza wizualna obrazów powierzchni betonów (rys. 5d) pozwoliła również na wykazanie niekorzystnego wpływu wydłużonego czasu mieszania mieszanki betonowej na skuteczność napowietrzania. Zbyt długi czas mieszania mieszanki betonowej skutkowało powstaniem w betonie serii 4 porów o nieregularnych kształtach i większych rozmiarach (rys. 5d). Porowatość betonu serii 4 jest o ponad 1% większa niż betonu serii 2, wykonanego w podobny sposób, lecz w krótszym o 6 minut czasie mieszania mieszanki betonowej w ostatnim etapie jej wykonania. Wydłużony czas mieszania spowodował łączenie się małych porów w większe (rys. 5d). Zarówno ilość, wielkość, jak i układ porów zdecydowanie różnił się w zależności od przyjętych zabiegów materiałowo-technologicznych (sposobu dozowania składników mieszanki betonowej, czasu mieszania, wilgotności kruszywa grubego). Wskazują na to uzyska-

ne wartości parametrów stereologicznych (tabela 2). Różnica zauważalna jest w: ilości pustek powietrznych (tabela 2, parametr AA), powierzchni właściwej porów (tabela 2, parametr  $\alpha$ ), jak również wielkości i dystrybucji porów (tabela 2, parametry  $\bar{T}$  i  $\eta$ ).

Najlepsze, z punktu widzenia mrozoodporności betonu, ułożenie porów uzyskano dla betonu serii 3. W przypadku tego betonu, przy najmniejszym zwiększeniu porowatości w stosunku do pozostałych betonów napowietrzanych, uzyskano największą powierzchnię właściwą  $\alpha$  oraz najmniejsze wartości średniej cięciwy pora  $\bar{T}$  i średniej odległości między środkami porów  $\eta$  (tabela 2). Uzyskane wyniki świadczą o powstaniu w betonie serii 3 pęcherzyków powietrza o niewielkich rozmiarach i ułożonych blisko siebie. W przypadku pozostałych betonów zabieg napowietrzania nie dał tak dobrych rezultatów, a jednocześnie znacząco wpłynął na obniżenie wytrzymałości tych betonów (rys. 4).

Parametrem wprowadzonym przez Powersa [5], dobrze charakteryzującym mrozoodporność betonu napowietrzonego jest współczynnik rozstawu porów  $\bar{L}$ . Definiowany jest on jako przeciętna odległość dowolnego punktu w zaczynie od krawędzi najbliższego położonego pęcherzyka powietrza. Wytyczne normowe [6, 7] pozwalają określać go na podstawie poniższych równań:

$$\bar{L} = \begin{cases} \frac{P \cdot T_{\text{tot}}}{400 \cdot N}, & \text{dla } R \leq 4,342 \\ \frac{3}{\alpha} \cdot [1,4 \cdot (1 + R)^{1/3} - 1], & \text{dla } R > 4,342 \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

P – udział objętościowy zaczynu cementowego,

$T_{\text{tot}}$  – całkowita długość linii pomiarowej w mm,

N – całkowita liczba cięciw znajdujących się na liniach pomiarowych,

R – stosunek zaczyn/powietrze P/A,

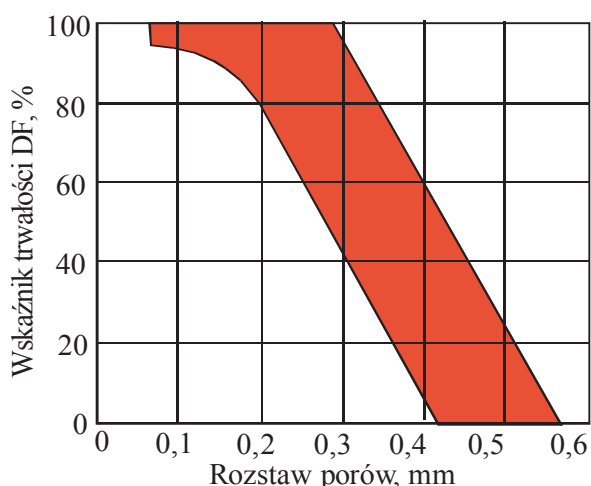
$\alpha$  – powierzchnia właściwa porów powietrznych w  $\text{mm}^{-1}$ .

Współczynnik rozstawu porów  $\bar{L}$  obliczany jest na podstawie pomiarów stereologicznych dokonywanych na powierzchni betonu. Do jego wyznaczenia stosuje się według [6] metodę trawersu liniowego (Rosiwała).

Najmniejsze wartości współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$  uzyskano w przypadku betonów serii 3 i 5. Jednak dla zapewnienia pełnej mrozoodporności betonu, współczynnik rozstawu porów powinien wynosić poniżej 0,25 mm. W przypadku betonów serii 3 i 5, wynosi on odpowiednio 0,38 i 0,36 mm. Wykorzystując do określenia trwałości betonów napowietrzanych współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$  (rys. 6), można określić wskaźnik trwałości

DF tych betonów na 15 do 70%. Należy zaznaczyć, że powyższa analiza trwałości może być przeprowadzana dla betonów napowietrzanych o stosunku wodno-cementowym w/c od 0,38 do 0,55.

Uwzględniając wszystkie parametry stereologiczne najlepszym, z punktu widzenia mrozoodporności, okazał się beton serii 3. W przypadku tego betonu uzyskano niską wartość współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$ , największą powierzchnię właściwą  $\alpha$ , najmniejszą wartość średniej cięciwy pora  $\bar{T}$  oraz najmniejszą wartość średniej odległości między środkami porów  $\eta$  (tabela 2).



**Rys. 6.** Orientacyjny obszar wartości wskaźnika trwałości DF [8]

Ocena mrozoodporności betonów na podstawie badań stereologicznych płaskich przekrojów, poprzez określenie współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$ , jest jedną z metod oceny skuteczności napowietrzania betonów. Uzyskanie zbliżonych wartości współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$  świadczy o podobnej odporność betonów na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie. Ważnym zatem, nie tylko z praktycznego punktu widzenia, wnioskiem jest wykazanie, na podstawie wyników przeprowadzonych badań stereologicznych, możliwości uzyskania betonów napowietrzanych, w przypadku których wartości współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$  są zbliżone (serie 2–5), jednak pozostałe określane parametry stereologiczne porów są znacznie zróżnicowane (tabela 2).

W przypadku betonów napowietrzanych, o tym samym składzie (serie 2–5), jednak wykonanych w zróżnicowany sposób uzyskano znaczną różnicę w porowatości. Beton serii 3 miał porowatość 7,5%, natomiast beton serii 5 aż 11,6%. Istotne różnice uzyskano również w przypadku powierzchni właściwej porów  $\alpha$  (uzyskano wartości od 9 do 12,1 mm<sup>-1</sup>), średniej cięciwy porów  $\bar{T}$  (uzyskano wartości od 0,033 do 0,043 cm) oraz średniej odległości między środkami porów (uzyskano wartości od 0,36 do 0,46 cm).

Zastosowana metoda oceny mrozoodporności betonów jest stosowana w przypadku betonów napowietrzanych. W przypadku betonów nienapowietrzanych wartości współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$  będą znacznie odbiegać od dopuszczalnych, jednak nie oznacza to, że beton nie będzie odporny na cykliczne zamrażanie/odmrażanie. W tabeli 2 podano wartości parametrów stereologicznych uzyskane dla betonu serii 1 bez środka napowietrzającego o składzie jak w seriach 2–5 oraz wartości uzyskane dla betonów z dodatkami pylastymi: seria P (pył krzemionkowy w ilości 10,2% m.c.), seria M (metakaolinit w ilości 14,9% m.c.) i seria F, (popiół fluidalny Flubet w ilości 14,9% m.c.). Stosunek woda/spoiwo w przypadku betonów serii P, M i F wynosił 0,45. Uzyskane dla betonów serii P, M i F wartości współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$  dużo powyżej wartości granicznej 0,25 mm nie świadczą jednak o braku mrozoodporności tych betonów. Betony te z uwagi na uszczelnienie struktury dodatkami pylastymi mogą być betonami mrozoodpornymi. Ocenę ich mrozoodporności należy przeprowadzić jednak metodami bezpośrednimi. Szerokim opracowaniem poruszającym kwestię mrozoodporności betonów z dodatkami, w tym pyłami krzemionkowymi, jest praca Rusina [1]. Problemy związane natomiast z brakiem odpowiedniej mrozoodporności betonów nienapowietrzanych o wytrzymałości powyżej 60 MPa, a nawet 100 MPa, w tym z dodatkiem pyłów krzemionkowych opisano w pracach [1, 9–11]. Wykazano również brak trwałości betonów, których stosunek wodno-cementowy wynosił poniżej 0,35, choć przyjmuje się, że gwarancją mrozoodporności betonu jest stosunek wodno-cementowy w/c poniżej 0,37. Przy liczeniu jednak stosunku wodno-cementowego betonów z dodatkami lub betonów na cementach z dodatkami należy jako cement uwzględnić jedynie masę składników klinkieru cementu portlandzkiego z pominięciem ewentualnych dodatków mineralnych. Niekiedy w przypadku betonów o niskim stosunku wodno-cementowych (w/c < 0,37) zachodzi jednak konieczność pełnej kontroli mrozoodporności takiego betonu metodami bezpośrednimi. Okazuje się bowiem, że trudne warunki pracy betonu narażonego nie tylko na działanie cyklicznego zamrażania/rozmarzania, ale również narażonego na agresję chemiczną, mogą prowadzić do zniszczenia struktury betonu. Rozwiązanie tego problemu było przedmiotem, między innymi pracy [12].

## 5. Podsumowanie

Przytoczone w artykule przykłady potwierdzają, że uzyskanie „dobrego” napowietrzania jest zadaniem trudnym i wieloaspektowym. Przedmiotem przeprowadzonych analiz były czynniki technolo-

giczno-materiałowe, takie jak: kolejność dozowania składników mieszanki betonowej, czas mieszania oraz wilgotność kruszywa grubego.

Badanie skuteczności napowietrzania przeprowadzono na płaskich przekrojach próbek betonowych metodami stereologicznymi. Badania wykazały znaczne różnice w końcowej zawartości powietrza badanych betonów oraz znaczące zróżnicowanie rozmieszczenia i wielkości porów. Największą objętość porów powietrznych, wynoszącą 11,6%, zaobserwowano w próbce z betonu serii 5. Uwidocznili się tu ujemny wpływ zastosowania kruszywa grubego o podwyższonej wilgotności. Niekorzystnym zabiegiem okazało się również wydłużenie czasu mieszania mieszanki betonowej (seria 4). W przypadku betonu serii 4 uzyskano gorsze ułożenie i wielkości porów, niż w przypadku betonu serii 2 czy 3.

Najniższą zawartość powietrza, a jednocześnie najlepszą dystrybucję porów o najmniejszych średnicach stwierdzono w przypadku betonu serii 3. W przypadku tego betonu mieszankę betonową otrzymano przez zmieszanie w pierwszej kolejności cementu, piasku i całości kruszywa grubego z  $\frac{3}{4}$  ilości wody zarobowej (czas mieszania 4 minuty), a następnie dodano pozostałą ilość wody wraz ze środkiem napowietrzającym (czas mieszania 3 min). Do wykonania mieszanki użyto kruszywo grube o wilgotności 0,64%. Beton ten okazał się najlepszym również z punktu widzenia wytrzymałości na ściskanie.

Badania stereologiczne miały również na celu pośrednie określenie odporności betonów na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie na podstawie współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$ . Wszystkie betony napowietrzane nie spełniły warunku zapewniającego mrozoodporność. Otrzymano wartości  $\bar{L} > 0,25$  mm. Współczynnik rozstawu porów  $\bar{L}$  okazał się mało wrażliwy na dokonywane zmiany w sposobie wykonania mieszanki betonowej. Otrzymano wartości z zakresu od 0,36 do 0,40 mm. Wykazanie możliwości uzyskania tak zbliżonych wartości współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$ , przy zdecydowanych różnicach pozostałych parametrów stereologicznych (tabela 2) potwierdzonych oceną wizualną (rys. 5), jest istotnym wnioskiem badawczym. Uzyskanie znacznego zróżnicowania w dystrybucji i wielkości porów w betonach serii 2–5 sugeruje odmienne zachowanie się tych betonów w przypadku cyklicznego zamrażania/rozmarzania, a uzyskane wartości współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$  sugerują podobną trwałość tych betonów. Określając jednak trwałość betonów serii 2–5 na podstawie współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$  i wskaźnika trwałości DF, można wykazać ich trwałość, na przykład dla  $\bar{L} = 0,4$  mm, na poziomie od 5 do 60% (rys. 6). Zatem tak duża rozbieżność wskaźnika trwałości DF potwierdza, że tę samą wartość współczynnika  $\bar{L}$  mogą mieć

betony o znacznym zróżnicowaniu rozmieszczenia i wielkości porów, a w konsekwencji odmiennej odporności na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie. Alternatywnym rozwiązaniem w ocenie mrozoodporności betonów napowietrzanych jest poszukiwanie innych wskaźników dystrybucji przestrzennej porów [13, 14] lub stosowanie metod bezpośrednich, które są szczególnie zalecane w przypadku betonów bez domieszek napowietrzających czy betonów z dodatkami pylastymi. Ocena mrozoodporności tych betonów za pomocą współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$  nie jest adekwatną.

Niektóre prezentowane w artykule wyniki badań są częścią pracy naukowej finansowanej ze środków na naukę w latach 2009–2011 jako projekt badawczy nr N N507 475337.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Rusin Z., Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement. Kraków 2002
- [2] Neville A.M., Właściwości betonu. Polski Cement. Kraków 2000
- [3] Konkol J., Prokopski G., The use of stereology for the fractal analysis of air porosity of concrete. *Inżynieria Materiałowa*, 4/2008, 231–234. VIII International Conference on Stereology and Image Analysis in Materials Science STERMAT 2008, Zakopane 2008
- [4] Konkol J., Tomasiak A., Porowatość betonu wyznaczona metodami stereologicznymi oraz jej wpływ na właściwości mechaniczne betonu. XI International Scientific Conference Lviv – Koszyce – Rzeszów „Current Issues of Civil and Environmental Engineering”, Lviv, Ukraine 2007, 456–462
- [5] Powers T. C., The air requirement of frost-resistant concrete. *Proceedings, Highway Research Board* 29, 1949, 184–202
- [6] PN-EN 480-11:2008. Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [7] ASTM C 457 – 98 Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete
- [8] U.S. Bureau of Reclamation, The air-void system of Highway Research Board cooperative concretes, Concrete Laboratory Report nr C-824. Denver, Colorado, April 1956
- [9] Fagerlund G., Trwałość konstrukcji betonowych. Arkady, Warszawa 1997
- [10] Fagerlund G., Frost resistance of high performance concrete – some theoretical considerations, Lund Institute of Technology, 1993
- [11] Pigeon M., Pleau R., Durability of concrete in cold climates. *Modern Concrete Technology Series*, E&FN SPON, 1995
- [12] Kurdowski W., Małolepszy J., Betony odporne na ekstremalne oddziaływanie środowiska. *Materiały konferencji: Materiały budowlane – nowe kierunki w chemii i technologii*. AGH, Kraków 1999, 129–149
- [13] Dequieft A. S., Coster H., Chermant L., Chermant J. L., Distances between air-voids in concrete by automatic methods. *Cement and Concrete Composites* 23, 2001, 247–254
- [14] Pleau R., Pigeon M., Laurecot J. L., Some findings on the usefulness of image analysis for determining the characteristics of the air-void system on hardened concrete. *Cement and Concrete Composites* 23, 2001, 237–246