

Beata Łązniewska-Piekarczyk¹

Patrycja Miera²

MROZODPORNOŚĆ BETONÓW WYKONANYCH Z INNOWACYJNYCH CEMENTÓW NAPOWIETRZAJĄCYCH

Streszczenie. W referacie analizowane są wyniki badania właściwości mechanicznych, mrozoodporności wewnętrznej i powierzchniowej, współczynnika trwałości oraz charakterystyki struktury porowatości betonu wykonanego z udziałem innowacyjnego, napowietrzającego CEM II/B-V. Skład betonu przyjęto wg wytycznych PN-EN 480-1, a wartości w/c wg zaleceń PN-EN 206-1 dla klasy ekspozycji mrozowej XF. Cementy napowietrzające CEM II/B-V wykonano z udziałem dwóch rodzajów domieszki napowietrzającej – naturalnej i syntetycznej. Wyniki badań dowodzą, że beton charakteryzuje się mrozoodpornością wewnętrzną F150, mrozoodpornością powierzchniową FT2, niemal 100%-owym współczynnikiem trwałości oraz strukturą porowatości, spełniającą wymagania europejskich norm.

Słowa kluczowe: cement napowietrzający, mrozoodporność, współczynnik trwałości, struktura porowatości.

1. Wprowadzenie

W ocenie mrozoodporności betonu poszukiwano ekonomicznych metod umożliwiających pewne i szybkie oszacowanie odporności na cykliczne zamrażanie-rozmrażanie. Wśród metod materiałowo-strukturalnej ochrony betonu przed szkodliwym działaniem mrozu można wyodrębnić dwa zasadnicze trendy zmierzające do uzyskania maksymalnie szczelnej,

¹dr hab. inż. Politechnika Śląska, Beata.Lazniewska-Piekarczyk@polsl.pl

²dr inż. Politechnika Śląska, Patrycja.Miera@polsl.pl

nieprzeziąkliwej struktury, tj. poprzez obniżenie wskaźnika w/c, stosowanie dodatków mineralnych i domieszek uplastyczniających oraz osiągnięcie odpowiedniej mrozoodporności betonu przez właściwe napowietrzenie. Termin „napowietrzanie” odnosi się do powietrza celowo wytworzonego w mieszance betonowej, w wyniku działania domieszki napowietrzającej. W efekcie napowietrzenia uzyskuje się pory o średnicy rzędu 50 μm (od 10 μm do 300 μm wg [1]). Z punktu widzenia mrozoodporności betonu, ważne jest także, aby zapewnić możliwie duży udział porów żelowych i porów powietrznych o wymiarach 0,1÷0,2 μm .

Końcowa jakość napowietrzania betonu jest wypadkową oddziaływania wielu czynników materiałowych, technologicznych itp. [4], [25]. Ważniejszym czynnikiem materiałowym, wpływającym na mrozoodporność betonu, jest rodzaj cementu. Ogólnie zaleca się zwiększenie dawki domieszki napowietrzającej ponad zalecaną w przypadkach, gdy cement posiada zwiększoną powierzchnię właściwą lub charakteryzuje się niską zawartością alkaliów [1]. Jednak trudno jest jednoznacznie określić wpływ rodzaju cementu na stabilność napowietrzenia mieszanki i mrozoodporność betonu w związku z brakiem uporządkowanych badań w tym zakresie. Może się zdarzyć, że zmiana rodzaju cementu przy zachowaniu wszystkich innych technologicznych i materiałowych parametrów, może obniżyć mrozoodporność betonu [10],[22]. Problem ten jasno formułuje opinia Komitetu 225 (Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements) oraz Komitetu 201 (Guide to Durable Concrete) Amerykańskiego Instytutu Betonu (ACI). Stwierdzono, że „różne odmiany cementów portlandzkich oraz cementów wieloskładnikowych, umożliwiają osiągnięcie takiego samego poziomu mrozoodporności betonu, pod warunkiem prawidłowych proporcji składników oraz poprawnego napowietrzenia mieszanki” [25]. Dodatki mineralne wywołują korzystne zmiany w strukturze porowatości zaczynu (betonu) powodując zmniejszenie udziału porów kapilarnych i zwiększenie ilości porów żelowych [11]. Wpływ dodatków na mrozoodporność betonu ma charakter zmienny [21],[27] a ich jakość powoduje odmienne zapotrzebowanie na ilość środka napowietrzającego [1]. W przypadku zastosowania dodatku mineralnego, jako zamiennika części cementu, obserwuje się obniżenie zawartości powietrza w mieszance betonowej w stosunku do mieszanki zawierającej wyłącznie cement portlandzki o zbliżonej urabialności. Uzyskanie odpowiedniego napowietrzenia betonu z cementem o dużej zawartości dodatków mineralnych jest trudne i wymaga każdorazowo doboru ilości domieszki napowietrzającej (AEA) w zależności od rodzaju i ilości dodatku mineralnego

występującego w cemencie. Ponadto, wpływ dodatków na zapotrzebowanie, efektywność działania AEA i stabilność napowietrzenia ma charakter zmienny. W przypadku zastosowania dodatku mineralnego, jako zamiennika części cementu, przeważnie obserwuje się obniżenie zawartości powietrza w mieszance betonowej, w stosunku do mieszanki zawierającej wyłącznie cement portlandzki.

Celem prowadzonego projektu *PBS1/A2/4/2012 pt. „Innowacyjne Cementy Napowietrzające Beton”* jest opracowanie technologii produkcji innowacyjnych cementów napowietrzających beton: CEM II, CEM III i CEM V. Wobec wymienionych względów zasadniczym celem projektu jest opracowanie technologii produkcji innowacyjnych cementów napowietrzających beton, z wysoką zawartością dodatków mineralnych (CEM II, cement hutniczy CEM III i cement wieloskładnikowy CEM V). Przez cement napowietrzający należy rozumieć cement w skład, którego wchodzi określony rodzaj AEA, w optymalnie dobranej ilości tak, aby beton wykonany z takiego cementu był mrozoodporny i spełniał wymagania norm względem charakterystyki jego napowietrzenia (tablica 5).

Kraje należące do Unii Europejskiej dążą do ujednoczenia swoich norm, czego wynikiem jest przyjęta norma EN 206-1, dotycząca wymagań, właściwości i produkcji betonu, która przewidywana jest do stosowania w Europie w różnych warunkach klimatycznych i geograficznych, przy różnych poziomach ochrony konstrukcji oraz przy różnych, od dawna ustalonych, regionalnych tradycjach i doświadczeniu. Aby uwzględnić rozmaite możliwe sytuacje wprowadzono w niej klasy ekspozycji betonu (tablica 1).

Tablica 1. Klasy ekspozycji - agresywne oddziaływanie zamrażania/rozmarzania wg PN-EN 206-1

Oznaczenie klasy	Opis środowiska	Przykłady (o charakterze informacyjnym) występowania klas ekspozycji
XF1	Umiarkowane nasycenie wodą, bez środków odladzających	Pionowe powierzchnie betonowe wystawione na deszcz i zamarzanie
XF2	Umiarkowane nasycenie wodą ze środkami odladzającymi	Pionowe powierzchnie betonowych konstrukcji drogowych narażonych na zamarzanie i działanie środków odladzających z powietrza
XF3	Silne nasycenie wodą bez środków odladzających	Poziome powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie

XF4	Silne nasycenie wodą ze środkami odladzającymi lub wodą morską	Jezdnie dróg i mostów narażone na działanie środków odladzających; Powierzchnie betonowe narażone bezpośrednio na działanie aerozoli zawierających środki odladzające i zamarzanie; Strefy rozbryzgu w budowlach morskich narażone na zamarzanie
-----	--	--

Z uwagi na przyczyny powstawania uszkodzeń oraz na sposób badania, zgodnie ze stosowaną praktyką można wyróżnić dwa rodzaje mrozoodporności betonu, w odniesieniu do dominującego mechanizmu niszczenia, to jest mrozoodporność wewnętrzną oraz mrozoodporność zewnętrzną. W literaturze anglojęzycznej używane są dwa odmienne terminy, związane z powyższymi zjawiskami, odpowiednio - *frost resistance* i *scaling resistance*. W krajach europejskich, gdzie konstrukcje betonowe są narażone na zmienne oddziaływania klimatyczne (np. Dania czy Austria) w krajowych arkuszach uzupełniających normę EN 206-1 wprowadzono dodatkowe wymagania dotyczące napowietrzania betonu i wymagania związane z odpowiednią odpornością betonu na złuszczenie. Również w Polsce obowiązuje norma PKN-CEN/TS 12390-9: 2007 odnosząca się do badania odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie przy zastosowaniu soli. Z punktu oceny efektywności działania cementów napowietrzających, istotne jest sprawdzenie charakterystyki napowietrzenia betonu, wykonanego z udziałem innowacyjnych, napowietrzających cementów, w świetle wymagań normowych i odniesienie jej do rezultatów badania mrozoodporności wewnętrznej oraz odporności na powierzchniowe łuszczenie betonu.

Niniejszy referat przedstawia wyniki badań mrozoodporności i charakterystyki napowietrzenia betonu z innowacyjnym, napowietrzającym CEM II/B-V z uwagi na to, że największe problemy z właściwym napowietrzeniem występują w przypadku mieszanek betonowych zawierających popiół lotny. Główną ich przyczyną jest to, że występujący w popiele lotnym koksik o rozwiniętej powierzchni właściwej (straty prażenia) może absorbować na swojej powierzchni czynnik powierzchniowo aktywny, obniżając w ten sposób jego efektywność działania. W konsekwencji może być wymagana większa ilość domieszki napowietrzającej w celu uzyskania tego samego stopnia napowietrzenia mieszanki betonowej. Co więcej, jeżeli rozmieszczenie koksiku w masie betonu jest nierównomierne, wówczas mogą powstać w betonie obszary o różnej zawartości powietrza [3], [5], [28]. Popiół lotny nawet w małych ilościach zmniejsza o około 1% naturalną zawartość powietrza

[1], [5]. Wprawdzie Fagerlund [1] sugeruje, iż dla betonu z dodatkiem napowietrzającym wpływ popiołu lotnego jest nieznaczny pod warunkiem, że jego zawartość nie przekroczy 25% (ACI 318-95 zaleca ograniczenie pucolan do wartości 25%), jednak jeżeli rozmieszczenie nieopalonego koksiku w masie betonu jest nierównomierne, wówczas mogą powstać w nim obszary o różnej zawartości powietrza. Dlatego proponuje on większą dawkę domieszki napowietrzającej. Opracowane zostały specjalne domieszki napowietrzające zawierające składniki polaryzujące, które są selektywnie adsorbowane przez nieopalony węgiel.

Kolejnymi czynnikami, które wykazują znaczny wpływ na efekt napowietrzenia mieszanki, są m.in. wskaźnik wodno-cementowy i obecność domieszek chemicznych. Mieszanki betonowe o wysokiej zawartości cementu i niskim wskaźniku cementowo-wodnym wymagają szczególnie dużej dawki domieszki napowietrzającej, gdyż poprawne napowietrzenie jest możliwe pod warunkiem, że mieszanka zawiera dużo wody. Wpływ rodzaju domieszek napowietrzających na stabilność napowietrzenia jest także znaczny [13], [14]. Wymienione czynniki wzięto pod uwagę w badaniach mrozoodporności, zarówno wewnętrznej, jak i powierzchniowej (w obecności soli odladzających), współczynnika trwałości i charakterystyki porowatości betonu, których rezultaty są analizowane w referacie. Wyniki prezentowanych badań dotyczą betonu wzorcowego wg PN-EN 480-1.

2. Metodyka badań

2.1. Materiały

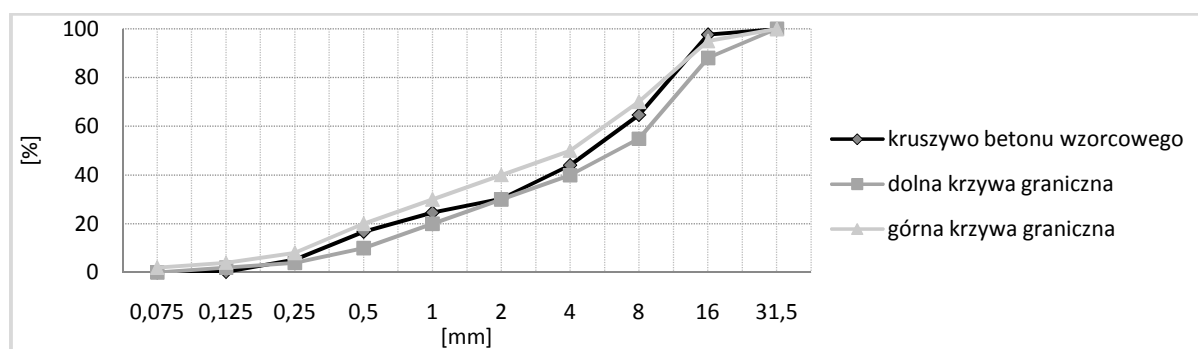
Rodzaje zastosowanych cementów przygotowanych metodą wspólnego mielenia z domieszką napowietrzającą zestawiono w tablicy 2. Skład betonu o $w/c = 0,45, 0,50$ i $0,55$ (tj. o wartościach granicznych zalecanych przez PN-EN 206-1 dla klas ekspozycji XF1-XF4) podano w tablicy 3 i na rysunku 1.

Tablica 2. Rodzaje cementów zastosowanych w mieszankach betonowych o wskazanym w/c

Seria	Rodzaj cementu	w/c
B2	CEM II/B-V, syntetyczna AEA	0,50
B4	CEM II/B-V, naturalna AEA	0,50
B9	CEM II/B-V, syntetyczna AEA	0,45
B10	CEM II/B-V, naturalna AEA	0,55

Tablica 3. Zestawienie składników w/c=0,50, 0,45 i 0,55 na zarób o objętości 1000 dm³

Składnik	Ilość/1000 dm ³	Ilość/1000 dm ³	Ilość/1000 dm ³
	w/c = 0,50	w/c = 0,45	w/c = 0,55
Woda, kg	175,00	167,64	181,45
Cement, kg	350,00	372,36	329,82
Piasek, kg	522,50	522,55	522,55
Kruszywo żwirowe, otoczkowe 2-8 mm, kg	511,90	521,00	512,00
Kruszywo żwirowe, otoczkowe 8-16 mm, kg	853,10	853,09	853,09
Objętość zaczynu, %	28,790	28,775	28,785
Szczelność	1000,22	1000,07	1000,16



Rysunek 1. Krzywa przesiewu stosu okruchowego kruszywa.

2.2. Zakres badań

W celu sprawdzenia **zawartości powietrza w mieszance** betonowej wykorzystano metodę ciśnieniową wg procedury PN-EN 12350-7 Badania mieszanki betonowej - Część 7: Badanie zawartości powietrza - Metody ciśnieniowe.

Wytrzymałość betonu na ściskanie i zginanie przeprowadzono zgodnie z normami PN-EN12390-2:2001 - Badania betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych, PN-EN 12390-3 - Pomiar wytrzymałości betonu na ściskanie w zakresie do 3000 kN i PN-EN 12390-5 - Pomiar wytrzymałości na zginanie betonu.

Badanie **mrozoodporności wewnętrznej** betonu F150 wykonano wg PN-88/B-06250 (pkt 2.7). Symbol F150 odpowiada 150 cyklom zamrażania i odmrażania, wykonanych według trybu podanego w normie, które powinien wytrzymać beton nie wykazując pęknięć,

ubytków masy większych niż 5%, ani obniżenia wytrzymałości większego niż 20% w stosunku do wytrzymałości próbek nie zamrażanych.

Oznaczenie **mrozoodporności powierzchniowej** betonu wykonano metodą „slab test” wg PKN-CEN/TS 12390-9:2007. Norma wyróżnia trzy kategorie betonów (tablica 4) w zależności od ilości złuszczonego materiału. Polega ona na określeniu masy złuszczonego materiału z górnej powierzchni próbki cyklicznie zamrażanej i odmrażanej w obecności 3% roztworu NaCl po 28 i 56 dniach.

Tablica 4. Kryteria oceny mrozoodporności wg normy PN-EN13877-2

Kategoria	Ubytek masy po 28 cyklach m_{28}	Ubytek masy po 56 cyklach m_{56}	Stopień ubytku m_{56}/m_{28}
FT0	brak wymagań	brak wymagań	brak wymagań
FT1	średnio $< 1,0 \text{ kg/m}^2$ (żaden pojedynczy wynik $> 1,5 \text{ kg/m}^2$)	brak wymagań	brak wymagań
FT2	średnio $\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$	średnio $< 1,0 \text{ kg/m}^2$ (żaden pojedynczy wynik $> 1,5 \text{ kg/m}^2$)	$\leq 2,0 \text{ kg/m}^2$

Charakterystyki porów powietrznych betonu wg PN-EN 480-11: 2008 dokonano na podstawie obserwacji płaskich przekrojów próbki, za pomocą tzw. metody trawersowej, gdzie obserwacje prowadzi się wzdłuż linii pomiarowych przebiegających równolegle do pierwotnej, odsłoniętej górnej powierzchni. Rejestruje się liczbę porów powietrznych przeciętych tymi liniami pomiarowymi oraz długość każdej cięciwy poru. Analiza matematyczna zarejestrowanych danych umożliwia opisanie systemu porów powietrznych za pomocą następujących parametrów: całkowita zawartość powietrza A , powierzchnia właściwa systemu porów powietrznych α , wskaźnik rozmieszczenia \bar{L} , zawartość mikroporów A_{300} , rozkład wielkości (średnic) porów powietrznych. Badania próbek betonowych obejmowały pobranie odwiertów rdzeniowych, badania tomograficzne, cyfrową analizę obrazu i matematyczne wyznaczenie parametrów struktury porów powietrznych z wykorzystaniem opracowanego programu komputerowego.

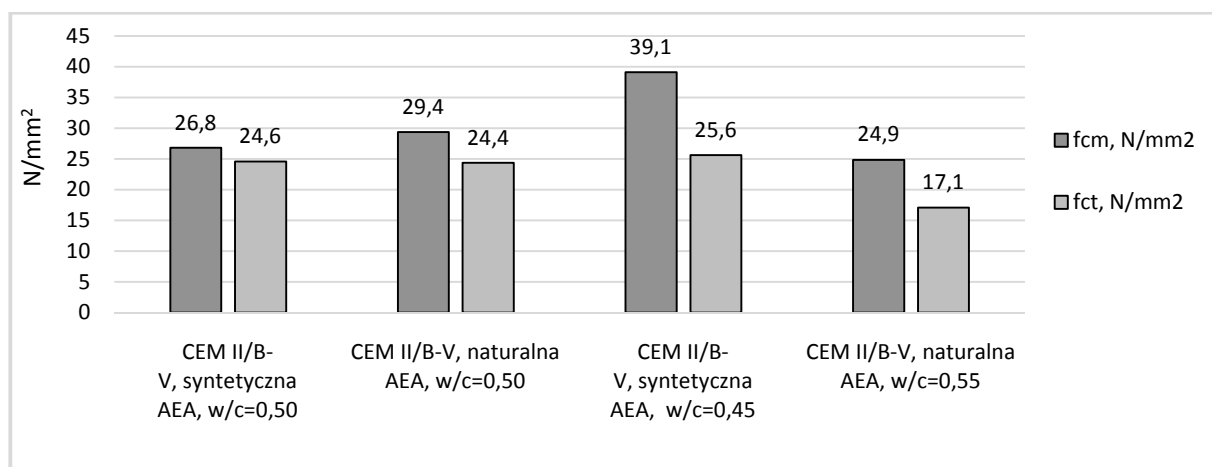
W zakres badań wchodziło także wyznaczenie **współczynnika trwałości DF (*Durability Factor*)** betonu. Dwie amerykańskie metody określania mrozoodporności ASTM C 666 A lub B polegają na wyznaczeniu wartości współczynnika trwałości DF betonu. Próbki poddawane

są cyklicznemu zamrażaniu według jednego z dwóch możliwych sposobów, to jest w wodzie według tzw. metody A, lub w powietrzu według metody B, z następującym rozmrażaniem w wodzie. W prezentowanych badaniach zastosowano procedurę A. Po N cyklach zamrażania i rozmrażania określana jest względna wartość dynamicznego modułu sprężystości betonu, chyba, że wcześniej – po N cyklach – obniży się ona do 60% wartości początkowej. Umownie uznaje się, że mrozoodporny jest taki beton, dla którego stwierdzono $DF > 80\%$ oraz, że beton jest niemrozoodporny, gdy $DF < 60\%$. Liczbę cykli zamrażania-rozmrażania betonu w wodzie ograniczono do 150.

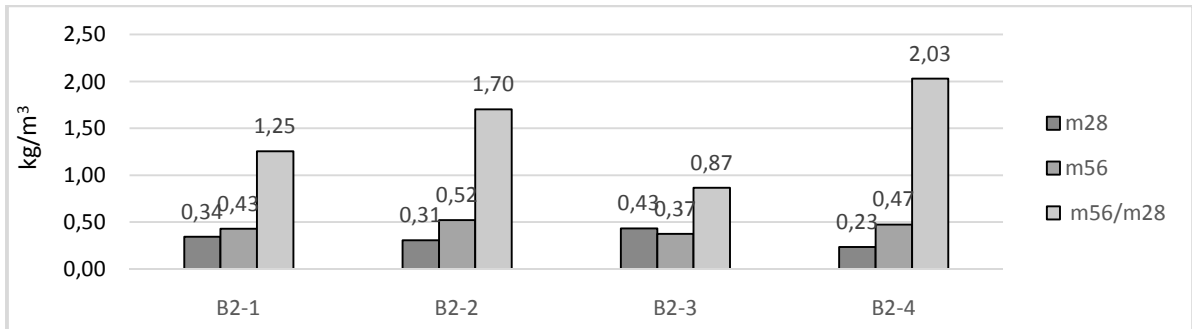
3. Wyniki badań i ich analiza

Na rysunku 2 porównano wyniki badania wytrzymałości na ściskanie i zginanie napowietrzonego betonu, w zależności od rodzaju cementu i w/c. Rodzaj domieszki napowietrzającej jest mało istotny ze względu na parametry mechaniczne betonu o w/c = 0,50. Zgodnie z oczekiwaniem, zmniejszenie wartości w/c powoduje wzrost wytrzymałości betonu, i odwrotnie.

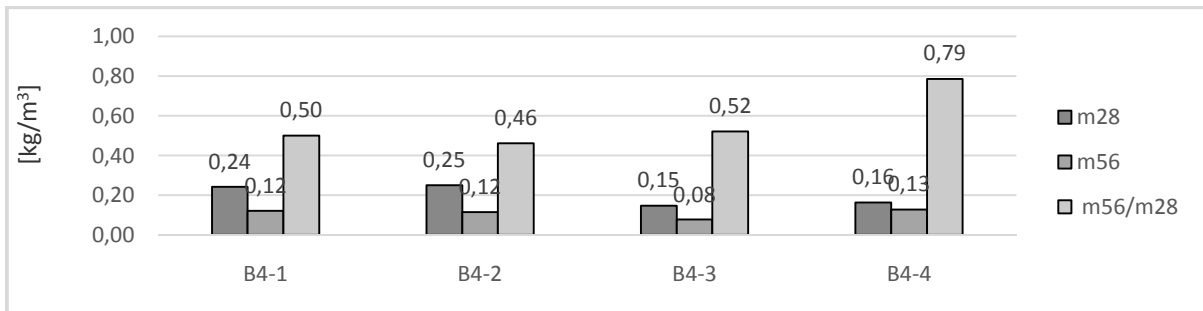
Rysunki 3-6 przedstawiają rezultaty badań dla poszczególnych serii zamrażanego i rozmrażanego betonu w obecności soli odładzających. Wyniki tych badań dowodzą, że wszystkie betony uzyskały kategorię FT2 (tablica 4). Mniejsze łuszczenie się betonu o w/c = 0,50 obserwowane jest, gdy wykonany on jest z udziałem domieszki napowietrzającej naturalnej, niż w przypadku użycia domieszki syntetycznej (rysunki 3 i 4).



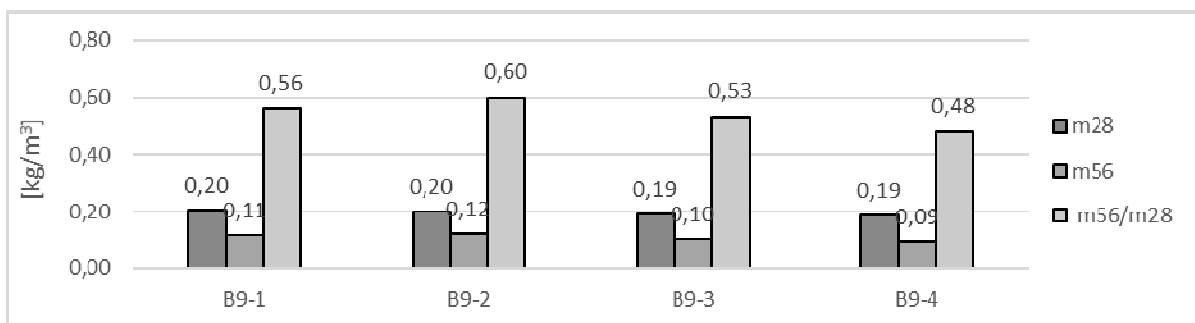
Rysunek 2. Średnia wytrzymałość na ściskanie (f_{cm}) i zginanie (f_{ct}).



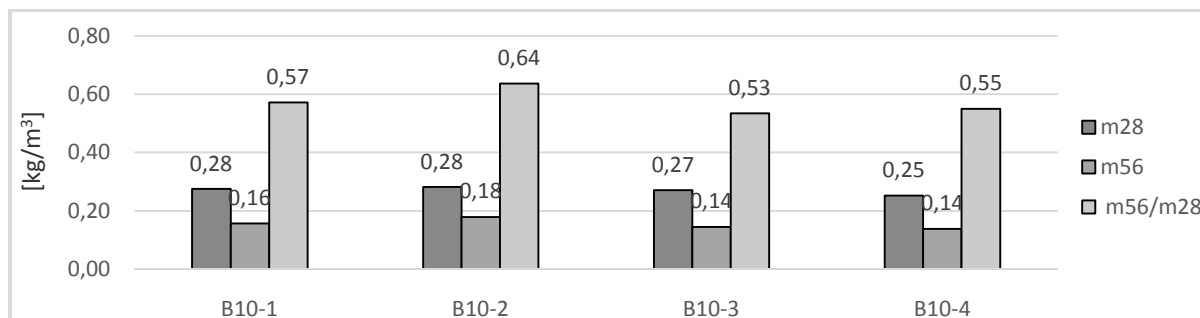
Rysunek 3. Suma złuszczonego betonu B2 (CEM II/B-V, AEA syntetyczna, w/c = 0,50 po 28 i 56 cyklach zamrażania-rozmrażania w obecności soli odladzających oraz ilość złuszczonego betonu po 56 cyklach w stosunku do ilości po 28 cyklach. Kategoria FT2.



Rysunek 4. Suma złuszczonego betonu B4 (CEM II/B-V, AEA naturalna, w/c = 0,45 po 28 i 56 cyklach zamrażania-rozmrażania w obecności soli odladzających oraz ilość złuszczonego betonu po 56 cyklach w stosunku do ilości po 28 cyklach. Kategoria FT2.



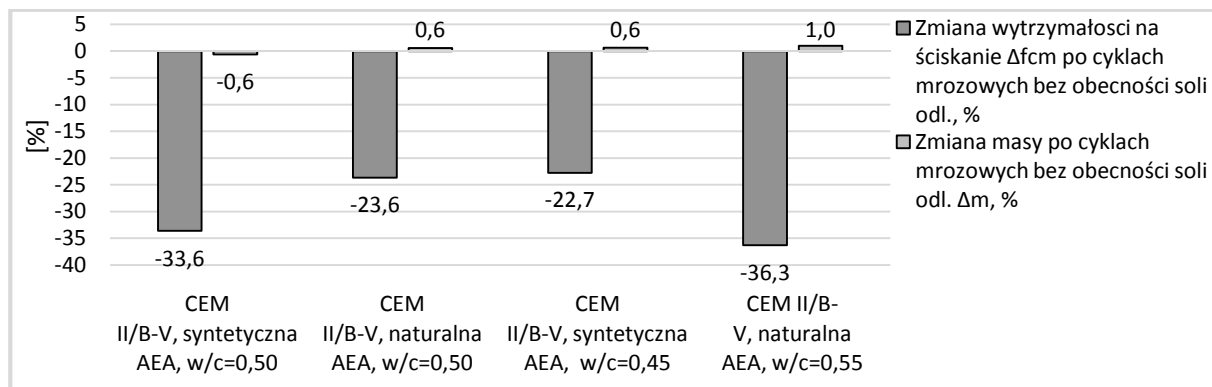
Rysunek 5. Suma złuszczonego betonu B9 (CEM II/B-V, AEA syntetyczna, w/c = 0,55) po 28 i 56 cyklach zamrażania-rozmrażania w obecności soli odladzających oraz ilość złuszczonego betonu po 56 cyklach w stosunku do ilości po 28 cyklach. Kategoria FT2.



Rysunek 6. Suma złuszczonego betonu B10 (CEM II/B-V, AEA naturalna, w/c=0,55) po 28 i 56 cyklach zamrażania-rozmrażania w obecności soli odladzających oraz ilość złuszczonego betonu po 56 cyklach w stosunku do ilości po 28 cyklach. Kategoria FT2.

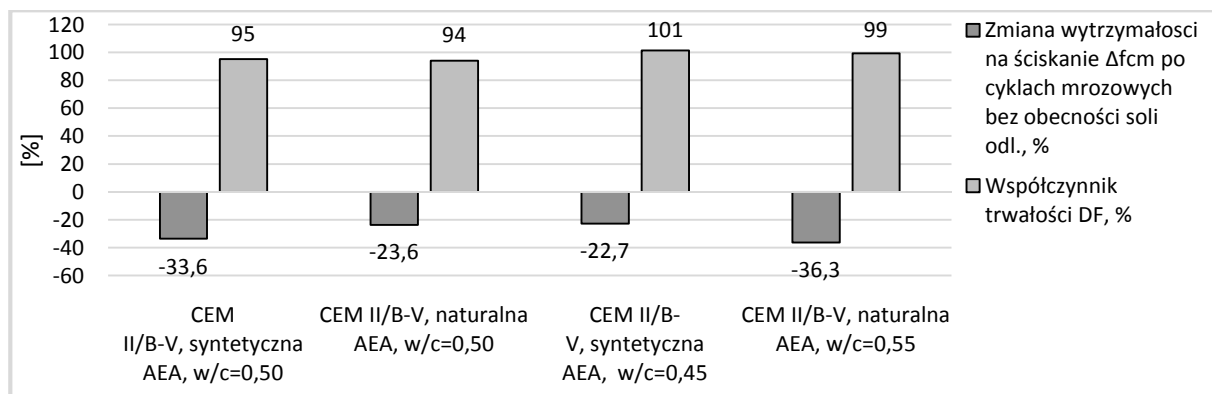
Na rysunku 7 zestawiono wyniki badania mrozoodporności wewnętrznej betonu F150 (bez udziału soli odladzających). Rezultaty badań dowodzą, że wszystkie betony uzyskały stopień mrozoodporności F150. Na uwagę zasługuje fakt, że wszystkie betony, niezależnie od w/c i rodzaju zastosowanej domieszki napowietrzającej, uległy wzmocnieniu po 150 cyklach zamrażania-rozmrażania. Literatura dotycząca tematu [25], [1] potwierdza wystąpienie takiego wzmocnienia z uwagi na postępującą hydratację cementów wieloskładnikowych, nawet w „niesprzyjających” warunkach. Z tego powodu badanie mrozoodporności betonu wykonanego z udziałem cementów wieloskładnikowych, zawierających dodatek pucolanowy, powinno się rozpocząć dopiero po 56 lub 90 dniach jego dojrzewania (w zależności od rodzaju cementu). Uwzględniają to Ogólne Specyfikacje Techniczne dla budownictwa drogowo-mostowego opublikowane na stronie Generalnej Dyrekcji Budowy Dróg i Autostrad.

W przypadku betonu o w/c = 0,50, wykonanego z udziałem domieszki napowietrzającej syntetycznej obserwuje się nieznacznie większy wzrost wytrzymałości po 150 cyklach mrozowych (rysunek 7), niż w przypadku betonu o mniejszym w/c, z uwagi na większą zawartość powietrza w jego objętości (rysunek 9).



Rysunek 7. Porównanie zmiany wytrzymałości i masy betonu na ściskanie po 150 cyklach zamrażania-rozmrażania bez udziału soli odładzających.

Rysunek 8 przedstawia wyniki badania F150 i współczynnika trwałości betonu DF także po 150 cyklach. Wyniki obu badań wskazują na bardzo dobrą ich zgodność. Wszystkie badane betony uzyskały F150 oraz niemal 100% współczynnik trwałości.



Rysunek 8. Porównanie zmiany wytrzymałości betonu na ściskanie i współczynnika trwałości betonu DF po 150 cyklach zamrażania-rozmrażania bez udziału soli odładzających.

Na rysunku 9 porównano wyniki oznaczenia zawartości powietrza w mieszance i betonie. Zalecana ilość napowietrzenia mieszanki betonowej według PN-EN 206-1 w klasie środowiska XF2-XF4 wynosi od 4 do 7%. Wyniki badań dowodzą, że stwardniałego betonu jest poprawna. Bardziej efektywna w napowietrzaniu betonu jest domieszka naturalna niż syntetyczna. Uważa się, że struktura powstałych porów stanowi skuteczne zabezpieczenie przed szkodliwym działaniem mrozu, jeżeli całkowita zawartość powietrza w betonie zawarta jest między 4% a 7%, średnia odległość do najbliższego pora powietrznego (spacing factor) \bar{L} poniżej 0,20 mm lub 0,22 mm, powierzchnia właściwa systemu porów α w przedziale

16-24 mm⁻¹, minimalna zawartość powietrza w porach mniejszych niż 0,3 mm (A₃₀₀) co najmniej 1,5% [2]. Kryteria oceny wg różnych dokumentów przedstawiono szczegółowo w [1] i [8].

W przypadku betonów narażonych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, europejskie wymagania odnośnie parametrów porów powietrznych w klasie XF1÷XF4 zestawiono w tablicy 5.

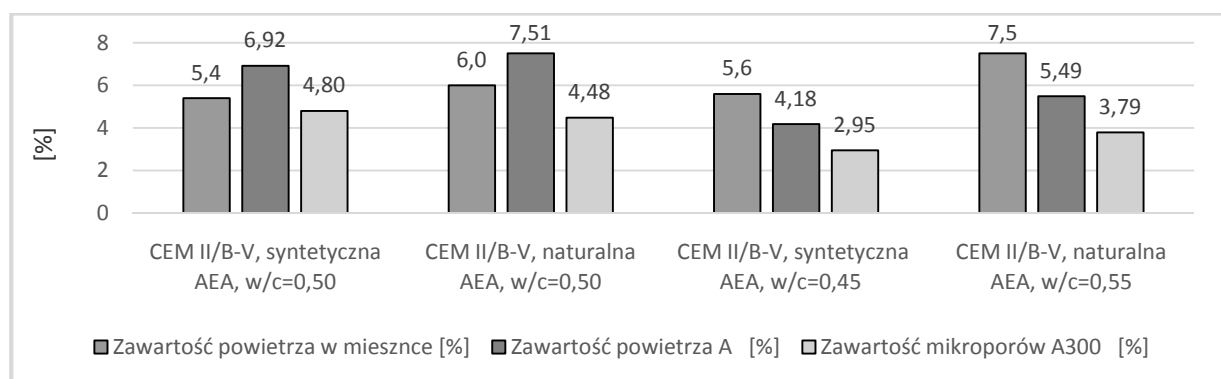
Tablica 5. Europejskie wymagania dotyczące napowietrzenia betonu **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**

Norma	Wymagane	Klasa ekspozycji mrozowej			
		XF1	XF2	XF3	XF4
Norma EN 206-1	Min. zawartość powietrza w mieszance	-	4,0	4,0	4,0
Norma austriacka ÖNORM B 4710-1	min. zawartość powietrza w mieszance,	-	2,5	2,5	4,0
	Min. zawartość mikroporów A ₃₀₀	-	1,0	1,0	1,8
	Max. Wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L}	-	-	-	0,18
Norma duńska DS. 2426	Min. zawartość powietrza w mieszance	-	4,5	4,5	4,5
	Min. zawartość powietrza A w betonie	-	3,5	3,5	3,5
	Max. Wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L}	-	0,20	0,20	0,20
	Odporność betonu na złuszczenia powierzchniowe	-	dobra	dobra	dobra
Norma niemiecka	Min. zawartość powietrza A w betonie	-	3,5% przy d _{max} = 63 mm; 4,0% przy d _{max} = 32 mm; 4,5% przy d _{max} = 16 mm; 5,5% przy d _{max} = 8 mm		
Niemieckie Federalne Ministerstwo Komunikacji ZTV Beton-StB 01	Beton z domieszką napowietrzającą i uplastyczniającą lub upłynniającą	Beton na nawierzchnie dróg			
	Min. zawartość powietrza w mieszance (średnia dzienna)	5,0	4,0		
	Min. zawartość mikroporów A ₃₀₀	1,5	1,8		
	Max. Wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L}	0,20	0,20		

Oznaczenia: \bar{L} – wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych w stwardniałym betonie wg PN-EN 480-11, mm; A – zawartość powietrza w stwardniałym betonie wg PN-EN 480-11, %; A₃₀₀ – zawartość mikroporów o wymiarze średnicy mniejszej niż 0,3 mm w stwardniałym betonie wg PN-EN 480-11, %.

Normowe wymagania określonego rozkładu porów powietrznych w stwardniałym betonie stosowane są także w niektórych stanach USA i w Kanadzie [6], [16], [1]. Wskazania "Guide to Durable Concrete" (ACI 201.2R) [9] ograniczają wartość wskaźnika rozstawu porów do wartości 0,20 mm. Natomiast norma kanadyjska A23.1 CSA wymaga, aby dla betonów zwykłych średnia wartość wskaźnika rozstawu porów nie przekraczała 230 μm . Obecnie przesunięto ta wartość do 260 μm . Z uwagi, że podczas pompowania betonu wartość tego wskaźnika wzrasta [1]. Ministerstwo Transportu w Kanadzie zakazało wbudowywania betonu wysokiej wytrzymałości za pomocą pomp na wszystkich mostach. Wymienione wymagania normowe, nie ujmują wytycznych wobec powierzchni właściwej porów, a przecież to także jest ważny parametr charakterystyki napowietrzenia, kształtujący mrozoodporność betonu. Według monografii [1] powierzchnia właściwa porów powinna wynosić $16\div 24 \text{ mm}^{-1}$.

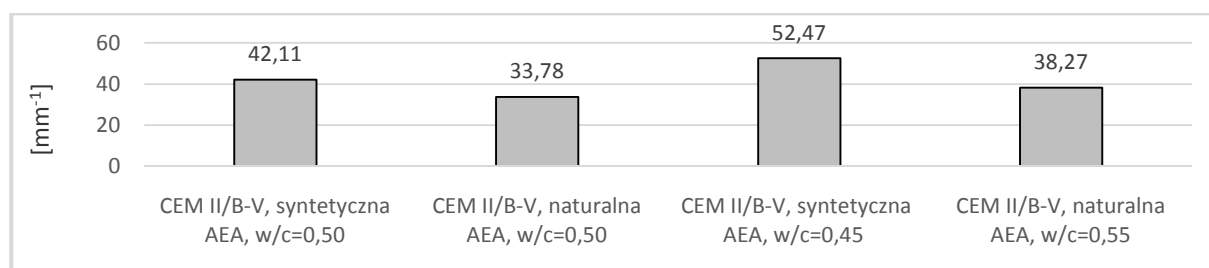
Rysunek 9 przedstawia także rezultaty oznaczenia napowietrzenia mieszanki betonowej, całkowitej zawartości porów powietrznych i zawartości mikroporów, bardzo korzystnych z punktu widzenia mrozoodporności betonu. Wraz ze wzrostem ilości wody w mieszance wzrasta jej napowietrzenie. Zawartość mikroporów jest bardzo duża, co korzystnie wpływa na mrozoodporność betonu. Według europejskich zaleceń minimalna zawartość mikroporów dla betonu mrozoodpornego wynosi przeważnie 1,5% (tablica 5). Wraz ze zwiększaniem napowietrzenia betonu, zawartość tych porów także się zwiększa (rysunek 9). Większa ilość pożądanych mikroporów wiąże się z zastosowaniem domieszki napowietrzającej syntetycznej, niż naturalnej.



Rysunek 9. Zawartość powietrza w mieszance i porów (A) oraz mikroporów w betonie (A_{300}).

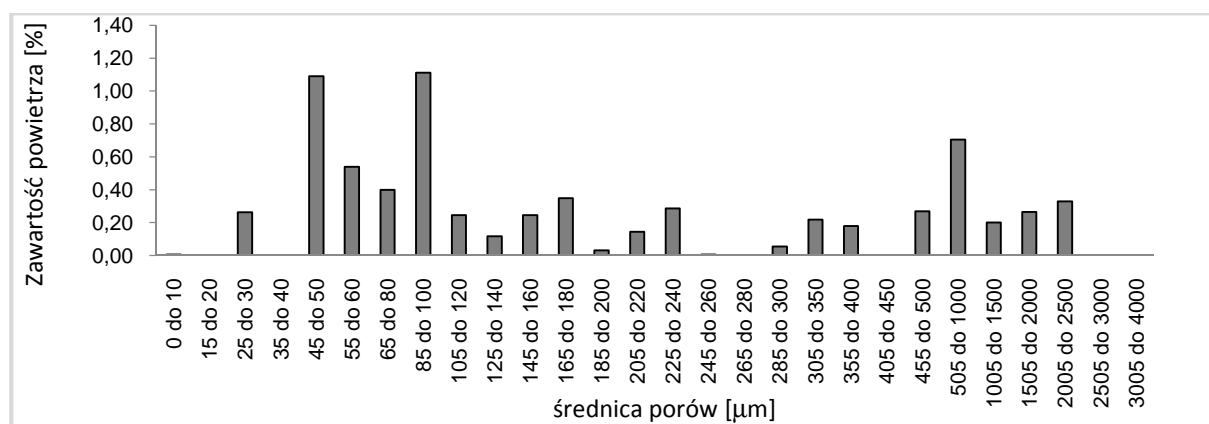
Na rysunku 10 zestawiono wyniki badania powierzchni właściwej porów. Normy europejskie (tablica 5) sugerują, aby minimalna powierzchnia właściwa porów wynosiła

25 mm⁻¹. W przypadku wszystkich betonów spełniono to zalecenie. W przypadku domieszki napowietrzającej syntetycznej pory powietrzne w betonie mają mniejsze średnice niż w przypadku domieszki napowietrzającej naturalnej, co przekłada się na ich powierzchnię właściwą (rysunek 10). Na rysunkach 11-14 pokazano rozkład wielkości porów w betonach. Beton z domieszką napowietrzającą syntetyczną posiada więcej porów o mniejszych średnicach, niż beton z domieszką napowietrzającą naturalną. Wyniki badań są zgodne z publikowanymi w artykułach [24], [15]. Z tego powodu domieszka napowietrzająca syntetyczna jest korzystniejsza ze względu na mrozoodporność i parametry mechaniczne betonu (rysunki 7 i 8). W przypadku betonu o w/c = 0,45 i domieszką napowietrzającą syntetyczną największy jest udział porów o średnicy 45-50 μm (rysunek 13). Natomiast beton o w/c = 0,55 i z domieszką napowietrzającą naturalną posiada najwięcej porów o średnicy 245-260 μm (rysunek 14). Nie różnicowało to jednak wyników badania mrozoodporności powierzchniowej (rysunki 5 i 6). Nie mniej jednak, masa ubytków betonu po 150 cyklach mrozoodporności bez udziału soli odladzających była większa, mimo mniejszej utraty wytrzymałości betonu (rysunek 7).

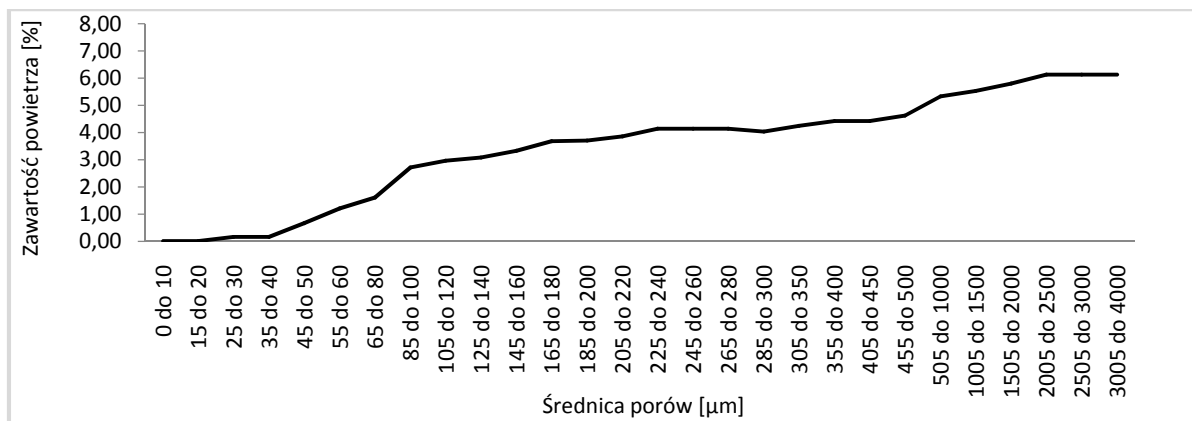


Rysunek 10. Powierzchnia właściwa porów (α) w betonie.

a)

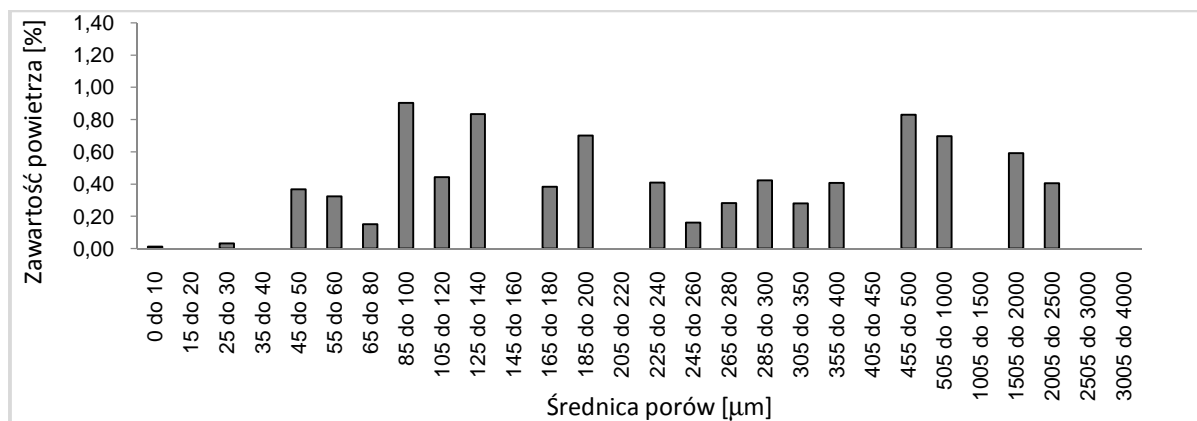


b)

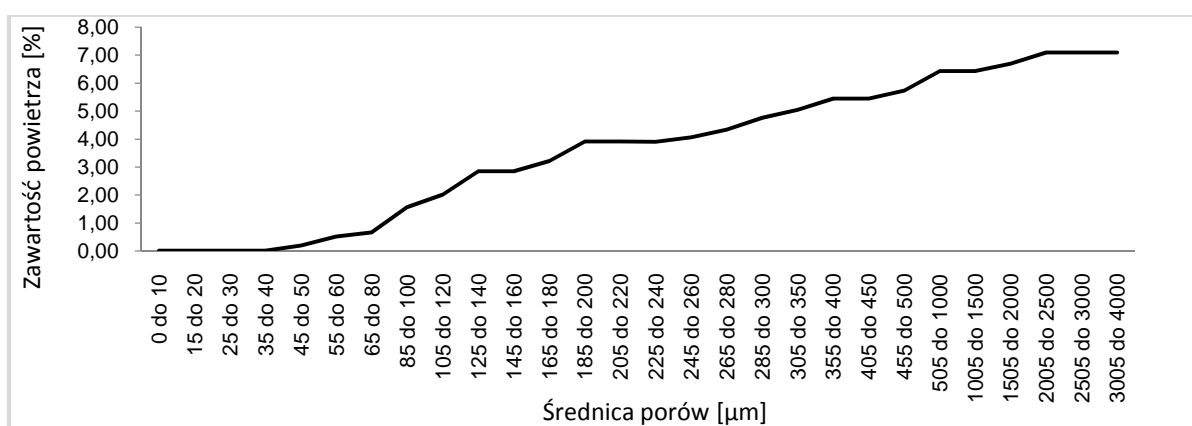


Rysunek 11. a) rozkład wielkości porów, b) skumulowana zawartość powietrza w betonie z CEM II/B-V, syntetyczna AEA, w/c = 0,50.

a)

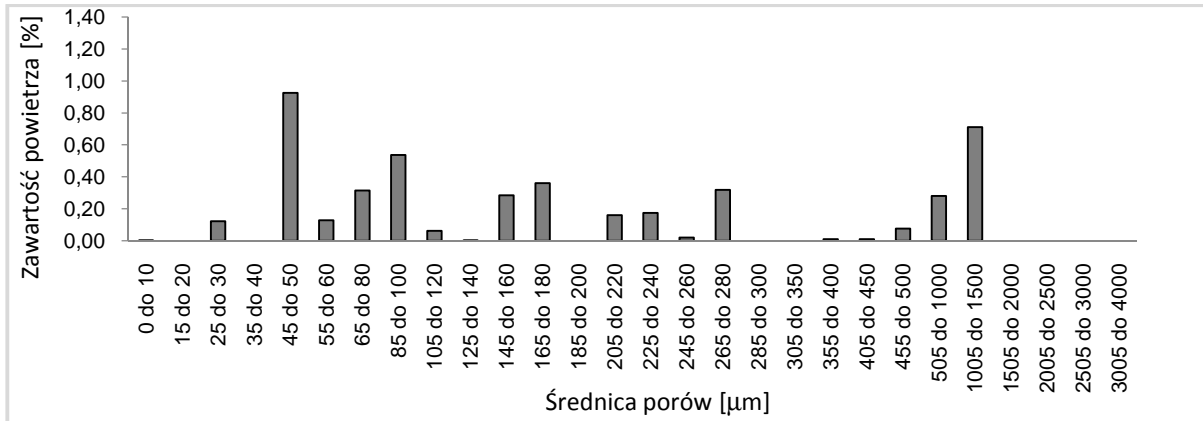


b)

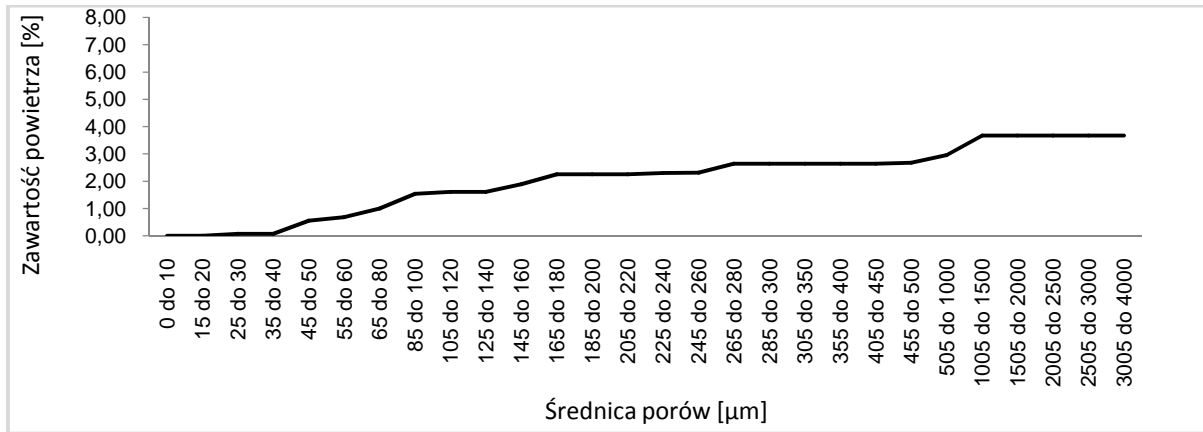


Rysunek 12. a) rozkład wielkości porów, b) skumulowana zawartość powietrza w betonie z CEM II/B-V, naturalna AEA, w/c = 0,50.

a)

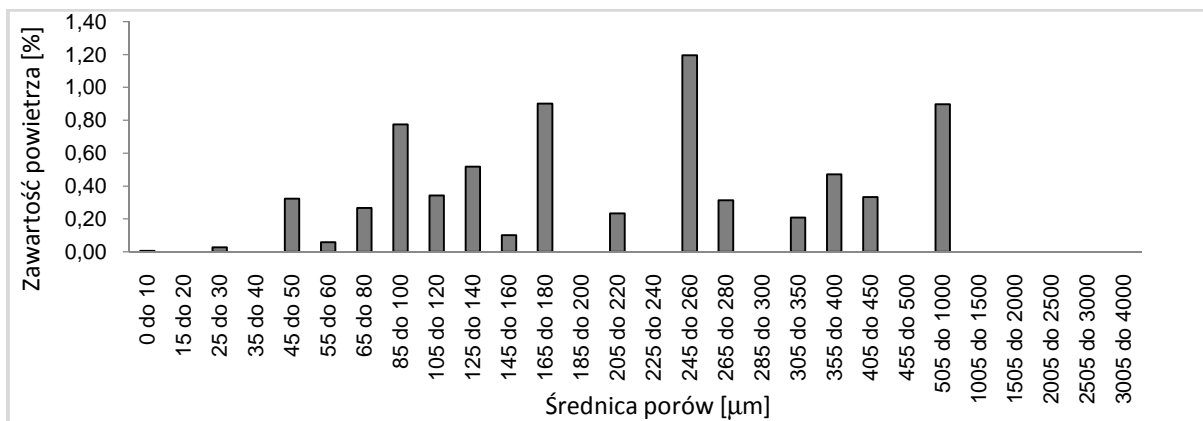


b)

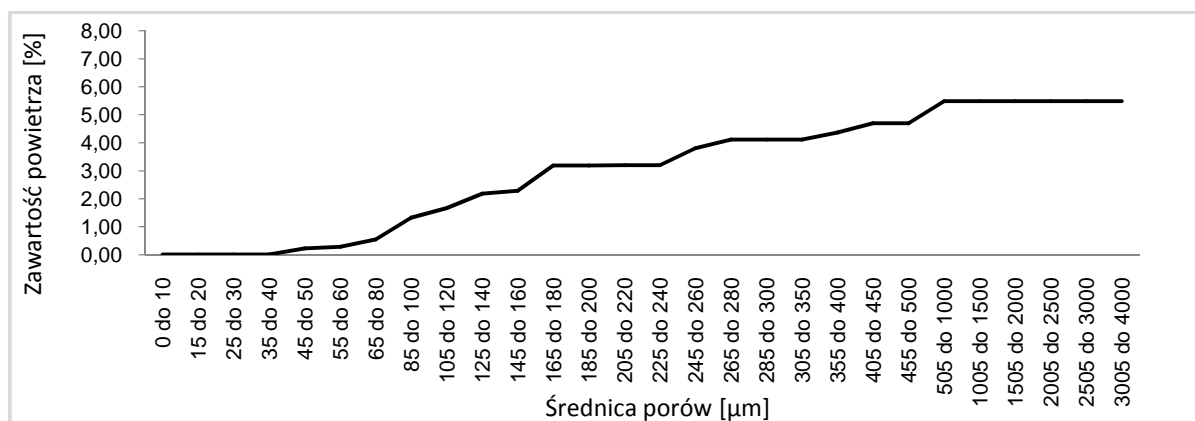


Rysunek 13. a) rozkład wielkości porów, b) skumulowana zawartość powietrza w betonie z CEM II/B-V, syntetyczna AEA, w/c = 0,45.

a)



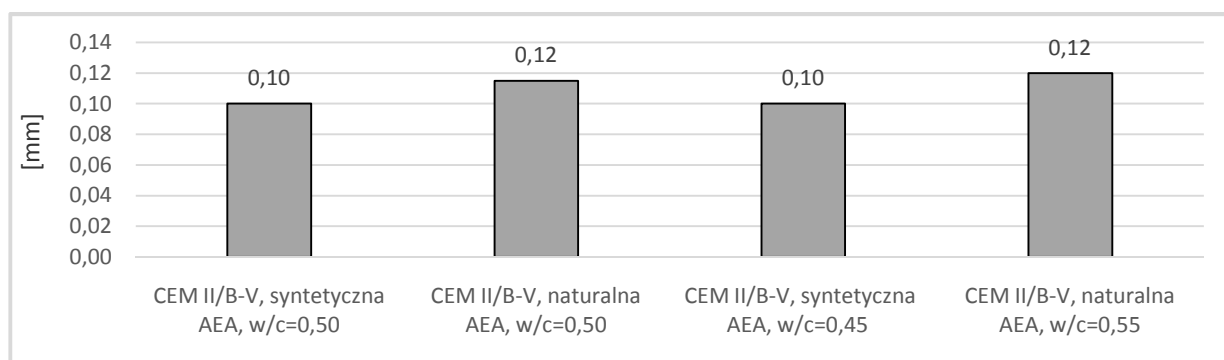
b)



Rysunek 14. a) rozkład wielkości porów, b) skumulowana zawartość powietrza w betonie z CEM II/B-V, naturalna AEA, w/c = 0,55.

Na uwagę zasługują także rezultaty oznaczenia wskaźnika rozstawu porów w betonach (rysunek 15). Zalecana przez normy europejskie maksymalna wartość tego wskaźnika wynosi przeważnie ok. 0,200 mm (tablica 5). W przypadku wszystkich betonów spełniono to zalecenie. Wzrost wartości w/c w betonie powoduje zwiększenie wielkości porów powietrznych (por. rysunki 13 i 14). Ze względu na zwiększoną ilość powietrza, rozstaw między porami nie ulega istotnemu zwiększeniu (rysunek 15).

Jak pokazano na rysunku 15, domieszka napowietrzająca syntetyczna ponownie okazała się być korzystniejsza od naturalnej, tym razem ze względu na wartość wskaźnika porów w betonie.



Rysunek 15. Wskaźnik rozmieszczenia porów (\bar{L}) w betonie.

Jak dowiodły tego prezentowane wyżej wyniki badań, innowacyjny, napowietrzający cement CEM II/B-V, bez względu na rodzaj zastosowanej domieszki napowietrzającej, zapewnia pożądaną strukturę napowietrzenia, jak i mrozoodporność wewnętrzną oraz powierzchnię betonu wg PN-EN 480-11 o $w/c = 0,45, 0,50$ i $0,55$.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań dotyczących betonu wzorcowego wg PN-EN-480-1 o $w/c = 0,45-0,55$ (zgodnie z zaleceniem PN-EN 206-1 dla klasy środowiska XF1-XF4) wykonanego z innowacyjnych, napowietrzających CEM II/B-V, wnioskować można, że:

- beton uzyskuje mrozoodporność wewnętrzną F150 oraz klasę odporności mrozowej FT2 w obecności soli odladzających,
- współczynnik trwałości DF po 150 cyklach zamrażania-rozmrażania betonu jest niemal 100%-owy,
- struktura porów powietrznych betonu jest poprawna i spełnia „z dużym zapasem” wymagania europejskich norm,
- wraz ze wzrostem ilości wody w mieszance obserwuje się wzrost jej napowietrzenia. Jednak całkowita zawartość powietrza w stwardniałym betonie o $w/c = 0,45, 0,50$ i $0,55$ należy do zalecanego przez PN-EN 206-1 przedziału od 4 do 7%. Wzrost wartości w/c powoduje zwiększenie wielkości porów powietrznych w betonie. Mimo tego, ze względu na wzrost ilości powietrza w betonie, rozstaw między porami nie ulega istotnemu zwiększeniu,
- wpływ rodzaju domieszki napowietrzającej jest istotny ze względu na mrozoodporność wewnętrzną, powierzchnię i charakterystykę porowatości betonu. Z uwagi na wymienione właściwości betonu bardziej korzystna jest domieszka napowietrzająca syntetyczna, gdyż pory powietrze betonu wykonanego z jej udziałem charakteryzują się mniejszymi średnicami.

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że mrozoodporność i struktura porowatości betonu z innowacyjnym, napowietrzającym cementem CEM II/B-S oraz z CEM III/A i CEM III/A NA jest równie dobra jak w przypadku betonu z napowietrzającym CEM II/B-V. Badania dotyczące m.in. mrozoodporności betonu z innowacyjnymi, napowietrzającymi

cementami CEM V/A i CEM V/B są w trakcie realizacji. Analiza wyników tych badań będzie przedmiotem kolejnego opracowania.

Prezentowane badania były finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Projektu PBS1/A2/4/2012 pt. „Innowacyjne Cementy Napowietrzające Beton”.

Literatura

- [1] Brandt A.M., J. Kasperkiewicz et al.: Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych. IPPT PAN, NATO Scientific Affair Division, Warszawa 2003.
- [2] Brandt A.M.: Diagnostyka betonu na podstawie badań struktury. 56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB. Kielce-Krynica 19-24 września 2010.
- [3] Fraay A.L.A., Bijen J.M., De Haan Y.M: The Reaction of Fly Ash in Concrete: A Crystal Examination. Cement and Concrete Research, Vol. 19, No 2, 1989, 235-246.
- [4] Gaynor R. D. and Mullarky J. I.: Effect of mixing speed of air content, NRMCA Technical Information Letter Nr 312, National Ready Mixed Concrete Assoc., Silver Spring, Maryland, Sept. 20, 1974.
- [5] Gebler S., Klieger P.: Effect of Fly Ash on the Air-Void Stability of Concrete. Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By-Products in Concrete. Publication ACI SP-79-5, 103-142.
- [6] Glinicki M.A., Cieśla J., Fordoński K.: Zagadnienia trwałości mostów betonowych w normach europejskich, Międzynarodowa Konferencja EKO-MOST 2006, Kielce, 16-17 maja 2006, 115-124.
- [7] Glinicki M.A.: Europejskie wymagania na beton napowietrzony w klasie środowiska XF. Drogownictwo, nr 3/2005, 86-88.
- [8] Glinicki M.A.: Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Warszawa 2011.
- [9] Guide to durable concrete. Reported by ACI Commiittee 201, ACI Journal, Vol. 74, No. 12, 1979, pp. 573-582.

- [10] Gunter M., Bier Th., Hilsdorf H.: Effect of curing and type of cement on the resistance of concrete to freezing in deicing salt solutions. SP 100-49, pp. 877-899.
- [11] Jasiczak J., Mikołajczyk P.: Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami. Przegląd tendencji krajowych i zagranicznych. Politechnika Poznańska, Poznań 1997.
- [12] Kjellsen K., Atlassi E.: Pore structure of cement silica fume system – Presence of hollow-shell pores. Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999, pp. 133-142.
- [13] Kobayashi M., Nakakuro E., Kodama K., Negami S.: Frost resistance of superplasticized concrete, ACI SP-68, 1981, pp. 269-282.
- [14] Litvan G.: Air entrainment in the presence of superplasticizers, ACI Journal, Vol. 80, No. 4, 1983, pp. 326-331.
- [15] Łażniewska-Piekarczyk, B: The type of air-entraining and viscosity modifying admixtures and porosity and frost durability of high performance self-compacting concrete, Construction and Building Materials 40 (2013): 659-671.
- [16] Meyer, F.: Air void distribution in concrete for the Great Belt Link, West Bridge. Nordic Concrete Research, Publication No.21, 17 p.
- [17] Nyame B., Illston J.: Relationships between permeability and pore structure of hardened cement paste. Magazine of Concrete Research, Vol. 33, No. 116, 1981, pp. 139-146.
- [18] Ogólne specyfikacje techniczne. Rozdział VIII – obiekty inżynierskie. Dział 01 – główne elementy konstrukcyjne. 01.01. – beton konstrukcyjny.
- [19] Papadakis V., Fardis M., Vayenas C.: Hydration and carbonation of pozzolanic cements. ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 2, 1992, pp. 119-130.
- [20] Papadakis V.: Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 1, 1999, pp. 79-86.
- [21] Persson B.: Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research 33 (2003) 373-379.
- [22] Peukert S.: Cementy powszechnego użytku i specjalne, Polski Cement Sp. Z. O. O. Kraków 2000.
- [23] Powers T.C.: The mechanism of frost action in concrete. Stanton Walker Lecture No 3, National Sand and Gravel Association, National Ready-Mix Concrete Association, Silver Spring MD, 1965.

- [24] Powers T.C.: Topics in concrete technology 3: characteristics of air-void systems, J PCA Develop Lab, 7 (1) (1964), pp. 23–41
- [25] Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych, Polski Cement, Kraków 2000.
- [26] Wawrzeńczyk J.: Diagnostyka mrozoodporności betonu cementowego. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce 2002.
- [27] Zielińska E.: Wpływ dodatku kredy na przebieg procesów hydratacji niektórych minerałów i cementu portlandzkiego, Prace Instytutu Technologii i Organizacji Produkcji Budowlanej Politechniki Warszawskiej, Nr 3, 1972.
- [28] Zieliński M.: Właściwości i struktura betonów z dodatkiem popiołów lotnych ze spalania węgla w kotłach fluidalnych, Rozprawa Doktorska, IPPT PAN, Warszawa, 2005.