

# METODY BADANIA MROZOODPORNOŚCI BETONÓW. OCENA MROZOODPORNOŚCI BETONU Z CEMENTEM HUTNICZYM

Marta KALISTY<sup>a</sup>, Dorota MAŁASZKIEWICZ<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>doktorant, Politechnika Białostocka, kierunek Budownictwo

<sup>b</sup>Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono przegląd metod badania mrozoodporności betonu. Opisano i scharakteryzowano następujące metody badawcze: CDF, niemiecką, szwedzką (Borås), ASTM C 672, 672 i 666, metodę bezpośrednią według PN-88/B-06250 i metodę według PN-EN 1338:2005. W badaniach własnych porównano nasiąkliwość i mrozoodporność laboratoryjnych próbek betonowych wykonanych z cementu portlandzkiego CEM I 32,5R oraz cementu hutniczego CEM III 32,5R bez napowietrzania. Badania mrozoodporności przeprowadzono dwiema metodami: metodą bezpośrednią wg procedury opisanej w normie PN-88/B-06250 oraz określono masę złuszczeń w obecności soli odladzającej według procedury z normy PN-EN 1338:2005. Próbki wykonane z cementu hutniczego wykazały niższą odporność na działanie mrozu niezależnie od zastosowanej metody.

*Słowa kluczowe:* mrozoodporność betonu, cement hutniczy, środki odladzające.

## 1. Wstęp

Mrozoodporność można kształtować za pomocą stosowania: napowietrzania zaczynu cementowego, redukcji porów kapilarnych poprzez obniżenie wskaźnika wodno-cementowego, odpowiednio dobranego kruszywa i cementu oraz dodatków mineralnych (Rusin, 2002). Beton stosowany w budownictwie drogowym oprócz odporności na cykle zamrażania i rozmrażania musi być również odporny na działanie środków odladzających. Odporność ta jest istotnie zależna od rodzaju zastosowanego cementu.

Cement, który zapewniłby dużą trwałość betonu powinien charakteryzować się:

- zwiększoną odpornością na działanie czynników agresywnych chemicznie;
- niskim lub umiarkowanym ciepłem hydratacji;
- stałością objętości;
- wydłużonym czasem wiązania.

Cementem, który spełnia te wymagania jest między innymi cement hutniczy CEM III. Cement hutniczy różni się od cementu portlandzkiego CEM I: ciepłem hydratacji, odpornością na działanie czynników korozyjnych, czasem wiązania, szybkością przyrostu wytrzymałości oraz wpływem na urabialność mieszanki. Te właściwości przyczyniły się do szerokiego zastosowania cementu hutniczego w budownictwie masywnym, hydro-

technicznym, mostowym, drogowym, robotach fundamentowych, produkcji prefabrykatów oraz betonu samozagęszczalnego SCC i wysokiej wytrzymałości BWW (Giergiczny i Pużak, 2004).

Cement hutniczy może być produkowany przez wspólny przemiał klinkieru cementu portlandzkiego z suchym granulowanym żużlem wielkopiecowym lub przez mieszanie na sucho cementu portlandzkiego i żużla. Norma PN-EN 197-1:2002 wyróżnia trzy rodzaje cementów hutniczych w zależności od zawartości granulowanego żużla wielkopiecowego. CEM III/C jest czystym cementem żużlowym. Cement hutniczy siarczanoodporny HSR znalazł głównie zastosowanie w klasach ekspozycji środowiska XA2, XA3 i XA4. Nie znaleziono w literaturze jednoznacznych wyników dotyczących zachowania się betonu z cementem hutniczym w klasach ekspozycji XF1÷XF4, szczególnie w przypadku działania soli odladzających. Liczne badania świadczą o tym, że odporność na zamrażanie w obecności soli odladzających betonów z cementem hutniczym nawet przy niskim wskaźniku w/c ( $\leq 0,45$ ) i przy znacznym napowietrzaniu jest niewystarczająca (Deja, 2003). Są jednak wyniki badań świadczące o tym, że po początkowym szybkim łuszczeniu się powierzchni betonu z cementem hutniczym, jest on bardziej odporny w porównaniu z betonem z cementu portlandzkiego (Wiebenga, 1985). Szybsze początkowe złuszczenie może

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: d.malasziewicz@pb.edu.pl

być spowodowane karbonatyzacją słabej porowatej powierzchni betonu bądź rekrystalizacją węgla wapnia (Deja, 2003). Na istotny wpływ karbonatyzacji na odporność na złuszczenie mrozowe w obecności soli zaczynów zawierających żużel wielkopieczowy wskazują wyniki badań i modelowania zaprezentowane przez Copuroglu i Schlangena (2008).

## 2. Przegląd metod badań mrozoodporności stwardniałego betonu

Sole są regularnie stosowane do odładzania nawierzchni betonowych bądź chodników. Prowadzi to do powierzchniowych złuszczeń materiałów betonowych. Złuszczenia solne są to powierzchniowe uszkodzenia spowodowane zamrażaniem roztworów solnych na powierzchni betonowego elementu. Zniszczenia tego typu nie mają takiego samego charakteru jak uszkodzenia spowodowane wewnętrzną krystalizacją lodu, co skutkuje spadkiem wytrzymałości materiału. Złuszczenia mają charakter powierzchniowy i nie narażają jednorodności całego elementu betonowego. Jednak powierzchniowe zniszczenia sprawiają, że wewnętrzne partie elementu stają się narażone na wnikanie wilgoci i agresywnych mediów, które mogą wpłynąć na całkowitą trwałość betonu.

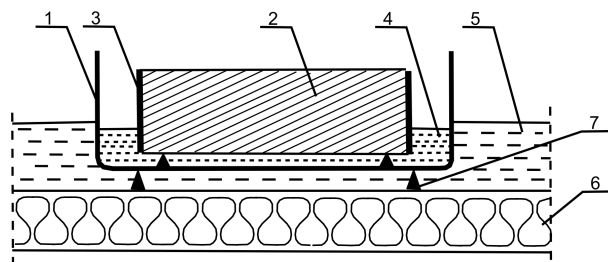
Największe masy złuszczeń uzyskuje się przy umiarkowanym stężeniu soli. Najniekorzystniejsze stężenie przyjmuje się na poziomie 3% wagowo (Valenza i Scherer, 2007).

Większość prezentowanych procedur badania mrozoodporności betonu jako czynnik oddziałujący na próbki wykorzystuje roztwór soli odładzającej w postaci NaCl. Różnice polegają na przygotowaniu próbki do badania, charakterystyce cykli zamrażania/roz-mrażania i ocenie destrukcji mrozowej.

### 2.1. Metoda CDF

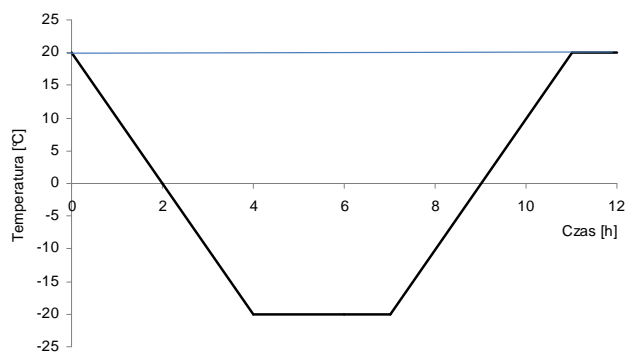
CDF (*Capillary Suction of De-icing Solution and Freeze-Thaw test*) w tłumaczeniu na język polski oznacza „podciąganie kapilarne roztworów soli i badanie zamrażania i rozmrażania”. Metoda CDF daje możliwość ilościowego pomiaru uszkodzonej powierzchni pod wpływem czynników atmosferycznych po 28 cyklach zamrażania i odmrażania w obecności soli odładzającej NaCl. Metoda ta może być wykorzystywana do badania powierzchni wyrobów i prefabrykatów, a także pobranych próbek z zarobów kontrolnych (Bebłacz i Kamiński, 2004; Kosior-Kazberuk, 2003).

Do badania wykorzystuje się próbki o wymiarach boku 15×15×15 cm., które po wykonaniu przez 7 dni dojrzewają w wodzie, a przez następne 21 dni przechowywane są w warunkach wilgotności względnej około 65%. Po upływie tego czasu próbki betonowe umieszcza się w pojemnikach na podkładkach (rys. 1) i przez 7 dni następuje kapilarne podciąganie 3% roztworu NaCl przez dolną powierzchnię. Powierzchnia ta będzie później poddawana cyklicznemu zamrażaniu i rozmrażaniu (Kosior-Kazberuk, 2003).



Rys. 1. Przekrój przez próbkę przeznaczoną do badania metodą CDF (Kosior-Kazberuk, 2003): 1 – pojemnik, 2 – próbka, 3 – izolacja z żywicy epoksydowej, 4 – roztwór NaCl, 5 – ciecz mrozująca, 6 – izolacja cieplna, 7 – podkładki dystansowe

Nasączone próbki umieszcza się w komorze zamrażarki. W czasie trwania 12 godzinowego cyklu zamrażania i rozmrażania temperatura zmienia się od +20°C do -20°C (rys. 2). Po 28 dniach zbiera się i suszy złuszczonego materiał. Określa się jego masę w przeliczeniu na 1 m<sup>2</sup> powierzchni betonu. Beton mrozoodporny wykazuje ubytek masy po 28 cyklach zamrażania i odmrażania mniejszy niż 1,5 kg/m<sup>2</sup>. Proporcja ubytków masy po 28 cyklach do ubytków po 14 cyklach powinna być mniejsza niż 2 (Bebłacz i Kamiński, 2004; Kosior-Kazberuk, 2003).



Rys. 2. Zakres zmian temperatury próbek betonowych w czasie według CDF według Beblacz i Kamiński (2004)

Zalety metody CDF (Bebłacz i Kamiński, 2004):

- krótki czas badania;
- możliwość oceny odporności betonu na złuszczenie;
- możliwość badania betonów już eksploatowanych, prefabrykatów i betonów laboratoryjnych.

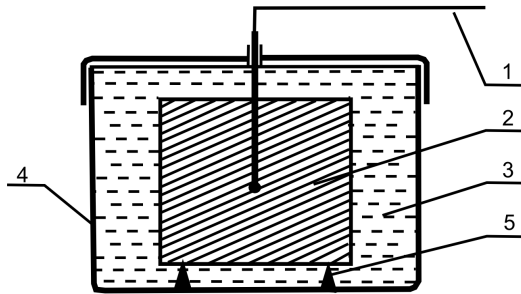
Wady metody CDF (Bebłacz i Kamiński, 2004):

- dość żmudny proces przygotowania próbek;
- narzucony czas dojrzewania próbek w wodzie (7 dni) – dla cementów hutniczych lub portlandzkich mieszanych czas dojrzewania próbek jest niewystarczający.

### 2.2. Metoda niemiecka (Rusin, 2002)

Według metody niemieckiej badanie przeprowadza się na próbkach sześciennych o wymiarach 10×10×10 cm. W czasie pierwszych 28 dni po ich wykonaniu próbki przechowywane są w warunkach analogicznych jak w metodzie CDF. Następnie zważone próbki umieszcza się w pojemnikach z 3% roztworem NaCl i nasycy się przez 24 godziny. Ponownie waży się próbki w celu

wyznaczenia absorpcji cieczy i umieszcza się w komorze zamrażarki. Próbkę przeznaczoną do badania przedstawia rysunku 3. W czasie 24 godzinowego cyklu temperatura zmienia się z  $+20^{\circ}\text{C}$  do  $-15^{\circ}\text{C}$ .



Rys. 3. Próbką przeznaczoną do badania mrozoodporności metodą niemiecką (Kosior-Kazberuk, 2003): 1 – sonda temperaturowa, 2 – próbka, 3 – ciecz mrozująca, 4 – pojemnik, 5 – podkładki dystansowe

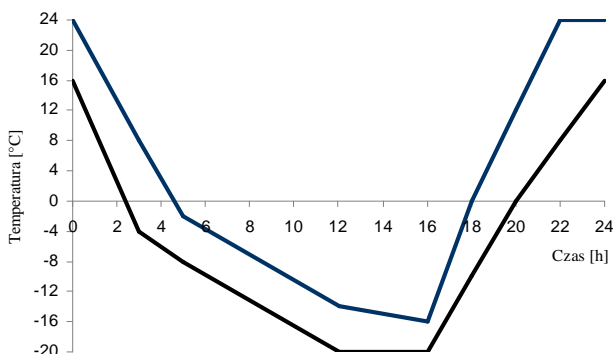
### 2.3. Metoda szwedzka (Borås)

Metoda szwedzka według normy SS 13 72 44 pozwala na badanie odporności na działanie środków odladzających powierzchni betonowej i betonu. Jest stosowana do oceny odporności na złuszczenie betonu głównie w konstrukcjach mostowych. Metodę Borås uważa się za najbardziej surową do określania mrozoodporności. Odzwierciedla warunki często występujące w rzeczywistości (Kosior-Kazberuk, 2003).

Do badania wykorzystuje się próbki betonowe o wymiarach  $15 \times 15 \times 15$  cm, które po wykonaniu przechowuje się przez 7 dni w wodzie, a przez następne 14 dni w temperaturze  $18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  i wilgotności względnej 65%.

Badaniu poddaje się płytki grubości 5 cm wycięte z kostek, które okleja się miękką gumą, pozostawiając nieoklejoną powierzchnię cięcia. Brzeg gumy powinien wystawać 2 cm ponad krawędź próbki. Następnie wykonuje się izolację grubości 2,5 cm z pianki poliuretanowej. Powierzchnię badaną nasycy się wodą przez 72 godziny (Valenza i Scherer, 2007).

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg górnej i dolnej krzywej temperatury podczas badania mrozoodporności metodą Borås.



Rys. 4. Zakres zmian temperatury próbek betonowych w czasie według Borås

W tabeli 1 przedstawiono kryteria oceny mrozoodporności omawianą metodą.

Tabela 1. Kryteria oceny mrozoodporności betonu według metody Borås (Kosior-Kazberuk, 2003)

Mrozoodporność	Wymagania
Bardzo dobra	Średnia złuszczeń po 56 cyklach ( $m_{56}$ ) jest mniejsza niż $0,10 \text{ kg/m}^2$
Dobra	Średnia złuszczeń po 56 cyklach ( $m_{56}$ ) jest mniejsza niż $0,20 \text{ kg/m}^2$ lub średnia złuszczeń $m_{56}$ jest mniejsza niż $0,50 \text{ kg/m}^2$ , przy czym $m_{56}/m_{28}$ jest mniejsze niż 2 lub średnia po 112 cyklach ( $m_{112}$ ) jest mniejsza niż $1,00 \text{ kg/m}^2$
Dostateczna	Średnia złuszczeń po 56 cyklach ( $m_{56}$ ) jest mniejsza niż $1,00 \text{ kg/m}^2$ , przy czym $m_{56}/m_{28}$ jest mniejsze niż 2 lub średnia po 112 cyklach ( $m_{112}$ ) jest mniejsza niż $1,00 \text{ kg/m}^2$
Niedostateczna	Jeżeli nie są spełnione wymagania mrozoodporności dostatecznej

Zalety metody Borås (Bebłacz i Kamiński, 2004):

- możliwość badania betonów już eksploatowanych, prefabrykatów i betonów laboratoryjnych;
- możliwość oceny odporności betonu na złuszczenie.

Wady metody Borås (Bebłacz i Kamiński, 2004):

- dość żmudny proces przygotowania próbek;
- długi okres badania;
- narzucony czas dojrzewania próbek w wodzie (7 dni) - dla cementów hutniczych lub portlandzkich mieszanych czas dojrzewania próbek jest niewystarczający;
- stwierdzona zgodność badań jedynie dla betonów z cementu portlandzkiego o stosunku  $w/c = 0,40-0,50$  i zawartości powietrza do 7%.

### 2.4. Metoda ASTM C 672

W tej metodzie próbka pokryta jest 6 mm warstwą 3% roztworu NaCl. Grubość próbki wynosi minimum 75 mm. Cykl obejmuje ochładzanie próbki do temperatury  $-17,8 \pm 2,8^{\circ}\text{C}$  w czasie 16-18 h, rozmrażanie w temperaturze  $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$  trwa 6-8 h (Valenza i Scherer, 2007). Metoda ta przypomina metodę Borås. Różnica polega na tym, że boki i spód próbki nie są zaizolowane i roztwór soli nie jest przykryty folią w celu zapobieżenia odparowywaniu.

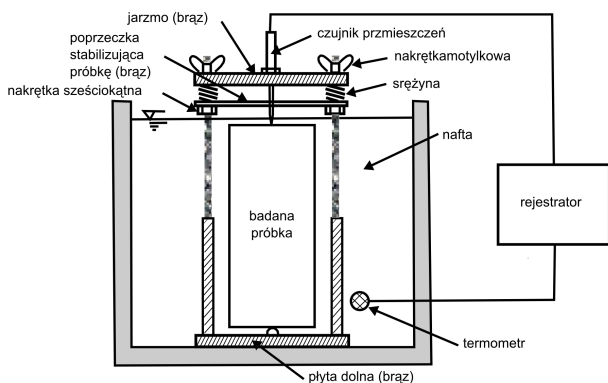
W metodzie ASTM C672 stosuje się subiektywną ocenę punktową pomiędzy 0 (brak złuszczeń) i 5 (poważne złuszczenia) po każdym 5 cyklach zamrażania/rozmrażania. Dokonuje się również pomiaru masy próbki i oblicza się ubytek masy w stosunku do masy wyjściowej. Te pomiary nie opisują jednak stopnia złuszczenia w sposób dokładny, ponieważ zmiana masy spowodowana jest również absorpcją wody (Valenza i Scherer, 2007).

Wyniki badań laboratoryjnych metodą ASTM C 672 wykazują znaczne różnice w odniesieniu do warunków rzeczywistych w konstrukcji, gdyż w metodzie tej nie

określono jednoznacznie warunków przeprowadzenia badania.

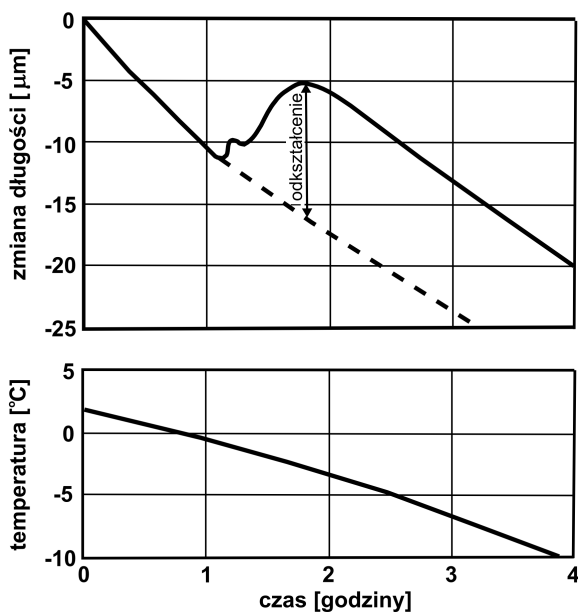
## 2.5. Metoda ASTM C 671

Metoda ASTM C 671 w odróżnieniu do metody ASTM C 672 bardziej przybliża warunki laboratoryjne do rzeczywistych. Próbki betonowe po wykonaniu dojrzewają w warunkach bardzo zbliżonych do rzeczywistych. Następnie zanurza się je w naftie (rys. 5) i chłodzi od temperatury  $+2^{\circ}\text{C}$  do  $-10^{\circ}\text{C}$  z szybkością  $2,8\pm 0,5^{\circ}\text{C/h}$  (Bebłacz i Kamiński, 2004).



Rys. 5. Przykład zestawu pomiarowego ASTM C 671 (Bebłacz i Kamiński, 2004)

W czasie chłodzenia próbek mierzy się zmiany temperatury i opowiadające im zmiany długości próbek. Na rysunku 6 przedstawiono typowe zmiany długości próbki i temperatury w czasie ochładzania. Po ukończeniu schładzania próbki umieszcza się w wodzie o temperaturze  $+2^{\circ}\text{C}$  na okres 14 dni do kolejnego cyklu zamrażania.



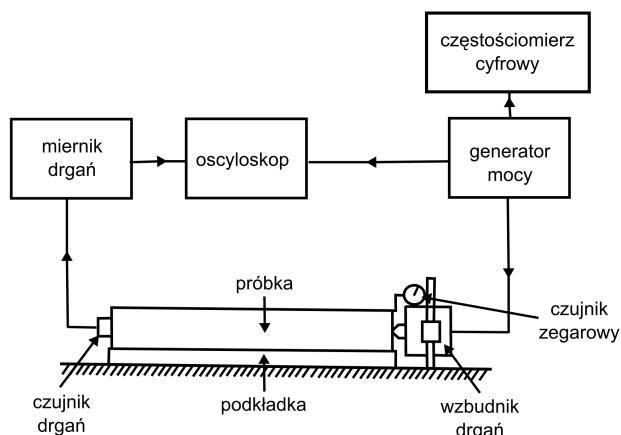
Rys. 6. Typowy zapis zmian długości próbki i temperatury w czasie ochładzania (Bebłacz i Kamiński, 2004)

Gdy przyrosty długości próbek w dwóch kolejnych cyklach zwiększą się co najmniej dwukrotnie, to beton

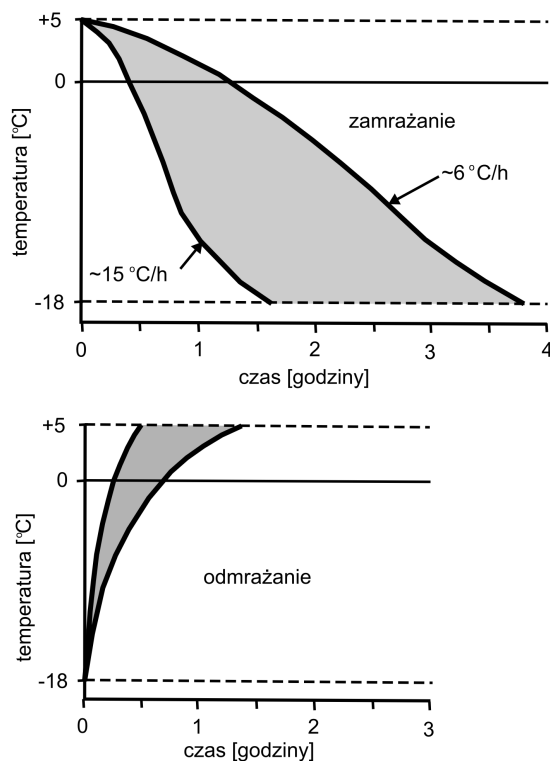
uważa się za nie mrozoodporny. Beton mrozoodporny nie wykazuje istotnych różnic w zakresie odkształceń w kolejnych cyklach zamrażania.

## 2.6. Metoda ASTM C 666

Do badania wykorzystuje się próbki betonowe o wymiarach  $75\times 100\times 400$  mm. Po wykonaniu próbki przechowywane są przez 14 dni w wodzie. Przed umieszczeniem w komorze zamrażarki dokonuje się pomiaru wymiarów próbek i częstotliwości rezonansowej. Zestaw do pomiaru częstotliwości rezonansowej próbek przedstawiono na rysunku 7. Czas jednego pełnego cyklu zamrażania i odmrażania powinien trwać od 2 do 5 godzin. Na rysunku 8 przedstawiono graniczne zakresy zmian temperatury próbek betonowych.



Rys. 7. Zestaw do pomiaru częstotliwości rezonansowych próbek (Bebłacz i Kamiński, 2004)



Rys. 8. Zakres dopuszczalnych zmian temperatury próbek betonowych w czasie według metody ASTM C 666 (Bebłacz i Kamiński, 2004)

Po 300 cyklach zamrażania i odmrażania próbek betonowych w 3 % roztworze NaCl dokonuje się oceny makroskopowej oraz pomiarów zmian długości próbki lub pomiaru rezonansowej częstości drgań. Oblicza się współczynnik trwałości  $DF$  korzystając ze wzoru:

$$DF = \frac{N}{M} \cdot \left( \frac{n_n}{n_0} \right)^2 \cdot 100, [\%] \quad (1)$$

gdzie  $M$  jest to ilość cykli,  $N = 300$  lub mniej jeśli wartość  $(n_n/n_0)^2$  spadnie poniżej 0,6,  $n_n$  jest to częstotliwość rezonansowa po  $n$  cyklach,  $n_0$  jest to częstotliwość rezonansowa przed rozpoczęciem pierwszego zamrażania.

Za beton mrozoodporny uważa się taki, który wykazuje wartość współczynnika  $DF$  większą niż 80%. Jeśli współczynnik  $DF$  wykazuje wartość mniejszą niż 60% lub próbka wykazuje zmianę długości powyżej 200  $\mu\text{m}/\text{m}$ , to beton można traktować jako nietrwały.

Zalety metody ASTM C 666:

- możliwość dostosowania metody do warunków eksploatacji obiektu;
- stwierdzona zgodność wyników laboratoryjnych z zachowaniem betonu w konstrukcji.

Wady metody ASTM C 666:

- długi czas badania;
- narzucony czas dojrzewania próbek w wodzie (2 tygodnie) - dla cementów hutniczych lub portlandzkich wieloskładnikowych czas dojrzewania próbek jest niewystarczający;
- brak możliwości oceny odporności betonu na złuszczenie, co jest wskazane przy stosowaniu środków odladzających.

### 2.7. Metoda zwykła według PN-88/B-06250

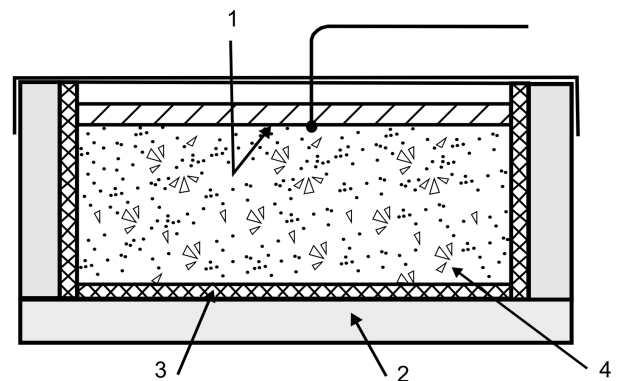
Do badania mrozoodporności betonu metodą zwykłą stosuje się próbki o kształcie sześciangu po upływie 28 dni dojrzewania. Badanie rozpoczyna się od nasycenia próbek betonowych wodą. Próbki porównawcze przeznaczone do badania wytrzymałości na ściskanie pozostawia się w wodzie w temperaturze  $+18 \pm 2^\circ\text{C}$  przez cały czas oznaczania odporności na działanie mrozu. Próbki do zamrażania układa się w komorze zamrażarki zachowując odstęp 20 mm. Zamrażarka poddaje je cyklicznemu zamrażaniu w temperaturze  $-18 \pm 2^\circ\text{C}$  przez okres 4 godzin i odmrażaniu przez całkowite zanurzenie w wodzie w temperaturze  $+18 \pm 2^\circ\text{C}$  w ciągu 4 godzin. Po ostatnim odmrażaniu przeprowadza się badanie wytrzymałości na próbkach porównawczych i poddawanych działaniu mrozu. Średni spadek wytrzymałości próbek po badaniu oblicza się za wzoru:

$$\Delta R = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \cdot 100, [\%] \quad (2)$$

gdzie  $R_1$  jest to średnia wytrzymałość na ściskanie próbek porównawczych – niezamrażanych, nasyconych wodą w MPa,  $R_2$  jest to średnia wytrzymałość na ściskanie próbek badanych, po ich ostatnim odmrażaniu, nasyconych wodą w MPa.

### 2.8. Badanie odporności na działanie mrozu w obecności soli odladzającej według PN-EN 1338:2005

Do badania mrozoodporności betonu z udziałem soli odladzającej stosuje się próbki po upływie 28 dni dojrzewania, które wcześniej klimatyzowano w temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej  $65 \pm 10\%$ . Powierzchnie boczne próbki okleja się elastycznym arkuszem gumowym, którego brzeg wystaje 2 cm ponad powierzchnię badaną. Silikonem wypełnia się szfowania na obwodzie próbki w celu zapewnienia szczelności wokół powierzchni badanej między betonem a arkuszem gumowym. Następnie wykonuje się ze styropianu izolację cieplną grubości 2,5 cm dolnych i bocznych powierzchni. Próbkę do badania odporności na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzającej przedstawia rysunek 9.



Rys. 9. Przekrój przez próbkę stosowaną do badania mrozoodporności betonu metodą zluszczeniową według PN-EN 1338: 1 – badana powierzchnia, 2 – folia z polietylenu, 3 – mieszanina zamrażająca, 4 – próbka do badania, 5 – arkusz gumowy, 6 – izolacja termiczna (styropian), 7 – urządzenie do pomiaru temperatury, 8 – uszczelnienie

Po ukończeniu klimatyzacji próbek, na badaną powierzchnię nalewa się wodę pitną o temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  na wysokość 5 mm i utrzymuje się takie warunki przez 72 godziny w celu oceny skuteczności uszczelnienia. 15 minut przed umieszczeniem próbek w zamrażarce wodę na badanej powierzchni próbek zastępuje się 3% roztworem NaCl. Wysokość warstwy roztworu powinna wynosić 5 mm. W celu zapobiegnięcia jej odparowaniu, próbki przykrywa się szkłem. Próbki betonowe umieszcza się w komorze zamrażarki i poddaje przemiennym cyklom zamrażania i rozmrażania. W mieszaninie zamrażanej na środku powierzchni wszystkich próbek zależność zmian temperatury w czasie powinna mieścić się między krzywymi granicznymi (tab. 2). Po 7 i 14 cyklach należy w razie konieczności uzupełnić roztwór NaCl.

Tabela. 2. Współrzędne punktów załamania według PN-EN 1338

granica górna		granica dolna	
Czas [h]	Temperatura [°C]	Czas [h]	Temperatura [°C]
0	24	0	16
5	-2	3	-4
12	-14	12	-20
16	-16	16	-20
18	0	20	0
22	24	24	16

Po 28 cyklach zbiera się z powierzchni badanej próbki złuszczonego materiał przez wyflukanie go do naczynia z pomocą butelki ze spryskiwaczem i zgarnianie pędzlem. Złuszczonego materiał przemywa się wodą pitną i suszy przez 24 godziny w temperaturze 105°C, a następnie waży. Ubytek masy oblicza się ze wzoru:

$$L = \frac{M}{A}, [\text{kg/m}^2] \quad (3)$$

gdzie  $M$  jest to masa całkowitej ilości złuszczonego materiału po 28 cyklach w kg,  $A$  jest to pole badanej powierzchni w  $\text{m}^2$ .

Zalety metody (Bebłacz i Kamiński, 2004):

- możliwość oceny odporności betonu na złuszczenie;
- możliwość badania betonów już eksploatowanych, prefabrykatów jak i betonów laboratoryjnych;
- krótki okres badania.

Wady metody (Bebłacz i Kamiński, 2004):

- dość żmudny proces przygotowania próbek,
- brak badań weryfikujących skuteczność metody.

### 3. Badania własne

W celu porównania mrozoodporności betonu z cementem hutniczym wykonano również próbki porównawcze z cementem portlandzkim.

#### 3.1. Charakterystyka materiałów użytych do badań

Do wykonania mieszanek betonowych wykorzystano:

- cement: portlandzki CEM I 32,5R oraz cement hutniczy CEM III/A 32,5R;
- wodę wodociągową spełniającą wymagania normy PN-EN 1008;
- kruszywo naturalne o uziarnieniu 0/16 mm;
- superplastyfikator w ilości 1% masy cementu.

Z powodu umiarkowanej ilości zaczynu w mieszance betonowej, bez domieszki uzyskano konsystencję mieszanek betonowej klasy S1. Dlatego w celu poprawy urabialności zastosowano superplastyfikator – uzyskana klasa konsystencji to S3.

W tabeli 3 przedstawiono skład chemiczny wykorzystanych w badaniach cementów, a w tabeli 4 skład mieszanek betonowych

Tabela 3. Skład chemiczny cementów

Składnik	Zawartość, %	
	CEM I 32,5 R	CEM III/A 32,5 R
CaO	64,1	52,1
SiO <sub>2</sub>	20,8	30,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,4	6,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,1	1,9
SO <sub>3</sub>	2,6	2,4

Tabela 4. Skład mieszanek betonowej wykonanej

Składnik	Ilość składnika
Kruszywo naturalne 0/16 mm	1906 $\text{kg/m}^3$
Woda	168 $\text{dm}^3/\text{m}^3$
Cement	350 $\text{kg/m}^3$
w/c	0,48

#### 3.2. Metodyka badań

Badanie nasiąkliwości próbek betonowych wykonanych z cementu CEM I 32,5R i CEM III/A 32,5R przeprowadzono zgodnie z normą PN-88/B-06250. Badanie wykonano na 12 próbkach w każdej serii.

W celu oceny zachowania się próbek betonowych w warunkach mrozowych zarówno bez soli odladzających jak i z solami, zastosowano dwie metody badawcze.

Badanie mrozoodporności metodą zwykłą betonu wykonanego z cementu CEM I 32,5R i CEM III/A 32,5R przeprowadzono zgodnie z normą PN-88/B-06250 (pkt 2.7). Ta procedura symuluje warunki pracy betonu narażonego na działanie wody przed zamrażaniem. W każdej serii badawczej 6 próbek poddawano cykлом zamrażania/rozmarzania i 6 próbek przechowywano w wodzie jako próbki referencyjne.

Badanie mrozoodporności metodą złuszczeniową betonu wykonanego z cementu CEM I 32,5R i CEM III/A 32,5R przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 1338:2005 (pkt 2.8). Jest to metoda normowa stosowana do oceny betonowej kostki brukowej i pozwala w krótkim czasie ocenić odporność na złuszczenia w obecności soli odladzających. Badanie przeprowadzono na 6 próbkach w każdej serii badawczej.

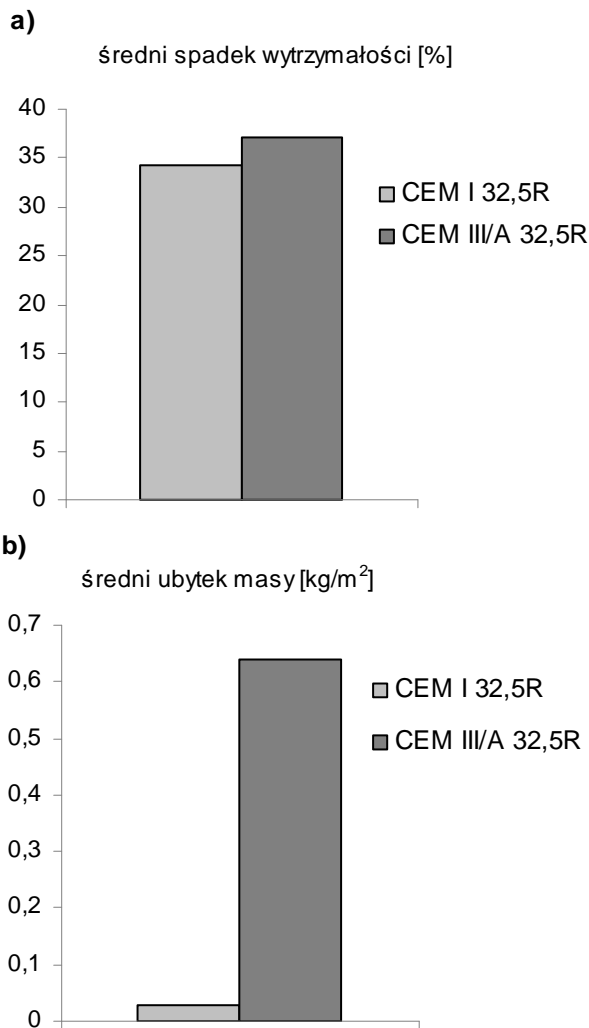
#### 3.3. Wyniki i dyskusja

Oba betony wykonane z cementu CEM I 32,5R i CEM III/A 32,5R spełniły wymagania normy PN-88/B-06250 (nasiąkliwość nie większa niż 5%). Nasiąkliwość betonu wykonanego z czystego cementu portlandzkiego wyniosła 4,39%, a z cementu hutniczego 4,78%. Mimo, że beton z cementem hutniczym CEM III/A 32,5R spełnił wymagania normy to jednak nasiąkliwości betonu wzrosła o około 9%.

W wyniku przeprowadzonej analizy wariancji otrzymano wartość statystyki  $F = 15,08$ . Dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  wartość krytyczna rozkładu  $F$ -Snedecora wynosi  $F_{\text{kryt};0,05} = 4,30$ . Jak widać wartość statystyki  $F$  przekracza wartość krytyczną  $F_{\text{kryt};0,05}$  co oznacza, że z prawdopodobieństwem popełnienia błędu równym 0,05 odrzucamy hipotezę zerową

na korzyść hipotezy alternatywnej, a więc rodzaj cementu ma wpływ na nasiąkliwość betonu.

Próbki betonowe wykonane zarówno z cementu CEM I 32,5R jak i CEM III 32,5R po 66 cyklach zamrażania/rozmarzania przy oględzinach makroskopowych wykazały jedynie nieznaczne zarysowania powierzchni i nieliczne spękania, natomiast spadek wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości próbek niezamrażanych wyniósł ponad 20%. Bardziej odporny na działanie mrozu po 66 cyklach zamrażania/rozmarzania okazał się beton wykonany z czystego cementu portlandzkiego. Większy spadek wytrzymałości na ściskanie o 8,2% wykazał beton wykonany z cementu hutniczego CEM III/A 32,5R (rys. 10).



Rys. 10. Wyniki badania mrozoodporności betonu: a) metoda zwykła, b) w obecności soli odladzającej NaCl

W wyniku przeprowadzonej analizy wariancji otrzymano wartość statystyki  $F = 0,15$ . Dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  wartość krytyczna rozkładu F-Snedecora wynosi  $F_{kryt;0,05} = 4,96$ . Jak widać wartość statystyki  $F$  jest mniejsza od wartości krytycznej  $F_{kryt;0,05}$  co oznacza, że z prawdopodobieństwem popełnienia błędu równym 0,05 odrzucamy hipotezę alternatywną na korzyść hipotezy zerowej, a więc rodzaj cementu nie ma

wpływu na spadek wytrzymałości betonu na ściskanie spowodowany agresją mrozową.

Większą odpornością na działanie mrozu w obecności soli odladzającej NaCl odznacza się beton wykonany z cementu portlandzkiego CEM I 32,5R (rys. 10). Beton wykonany z cementu hutniczego CEM III/A 32,5R wykazał 21 razy większy ubytek masy niż beton wykonany z cementu CEM I 32,5R. Mimo to, beton ten można uznać za mrozoodporny, gdyż spełnia wymagania normy PN-EN 1338:2005 dotyczącej ilości złuszczonego materiału. Masa badanego materiału z pojedynczej próbki betonowej w każdym przypadku jest  $\leq 1,5 \text{ kg/m}^2$  oraz średnia masa złuszczonego materiału dla obu betonów jest mniejsza niż  $1,0 \text{ kg/m}^2$ .

W wyniku przeprowadzonej analizy wariancji otrzymano wartość statystyki  $F = 6,77$ . Dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  wartość krytyczna rozkładu F-Snedecora wynosi  $F_{kryt;0,05} = 4,96$ . Jak widać wartość statystyki  $F$  jest większa od wartości krytycznej  $F_{kryt;0,05}$  co oznacza, że z prawdopodobieństwem popełnienia błędu równym 0,05 odrzucamy hipotezę zerową na korzyść hipotezy alternatywnej, a więc rodzaj cementu ma wpływ na ubytek masy betonu powstały w wyniku działania mrozu w obecności soli odladzającej NaCl.

#### 4. Wnioski

W oparciu o przeprowadzone własne badania i analizę wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Oba betony wykonane z cementu CEM I 32,5R i CEM III/A 32,5R spełniły wymagania normy PN-88/B-06250 pod względem nasiąkliwości betonu; w wyniku przeprowadzonej analizy wariancji stwierdzono, że rodzaj zastosowanego cementu ma wpływ na nasiąkliwość betonu – próbki betonowe z cementem hutniczym wykazały wyższą o około 9% nasiąkliwość.
2. Żaden z betonów nie spełnił wymagań normy PN-88/B-06250 dotyczącej mrozoodporności betonu badanej metodą zwykłą po 66 cyklach zamrażania i odmrażania. Spadek wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości próbek niezamrażanych był większy niż 20%; w wyniku przeprowadzonej analizy wariancji stwierdzono, że rodzaj zastosowanego cementu nie ma wpływu na spadek wytrzymałości betonu na ściskanie spowodowany agresją mrozową.
3. Możliwą przyczyną niezadowalającej mrozoodporności badanej metodą bezpośrednią, betonu wykonanego z cementu CEM III/A 32,5R jest brak napowietrzenia i użycie do wykonania mieszanki betonowej kruszywa naturalnego.
4. Beton wykonany z cementu CEM III/A 32,5R wykazał mniejszą odporność na działanie mrozu w obecności soli odladzającej NaCl, gdyż ubytek masy jest 21 razy większy niż w przypadku betonu wykonanego z cementu portlandzkiego CEM I 32,5R. Mimo to, beton ten, jak i beton wykonany z cementu CEM I 32,5R można ocenić jako mrozoodporny, gdyż

- w obu przypadkach średnia masa złuszczonego materiału jest znacznie niższa niż  $1,0 \text{ kg/m}^2$ .
5. W wyniku przeprowadzonej analizy wariancji stwierdzone, że rodzaj cementu ma wpływ na ubytek masy spowodowany cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem betonu w obecności soli odladzającej NaCl.

### Literatura

- Bebłacz D., Kamiński P. (2004). Metodyka badania oraz kryteria oceny odporności betonów nawierzchniowych na działanie soli odladzających. W: *Dni Betonu*, 2004.
- Copuroglu O., Schlangen E. (2008). Modeling of frost salt scaling. *Cement and Concrete Research*, 38 (2008), 27-39.
- Deja J. (2003). Freezing and de-icing salt resistance of blast furnace slag concretes, *Cement and Concrete Composites*, 25 (2003), 357–361.
- Giergiczny Z., Pużak T. (2004). Cement hutniczy CEM III składnikiem betonu o wysokiej jakości. *Materiały Budowlane*, 2/2004, 33-36.
- Kosior-Kazberuk M. (2003). Ocena mrozoodporności betonu zgodnie z wymogami nowej normy europejskiej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej*, Z. 23, Białystok, 103-118.
- Rusin Z. (2002). Technologia betonów mrozoodpornych. *Polski Cement*, Kraków.
- Wiebenga J. (1985). Frost and Frost-de-icing salt resistance of fly ash cement concrete. *TNO-IBBC*, report B-84-507/60.6.0190.
- Valenza II J.J., Scherer G.W. (2007). A review of salt scaling: I. Phenomenology. *Cement and Concrete Research*, 37 (2007), 1007–1021.

### METHODS OF TESTING CONCRETE FREEZE RESISTANCE. EVALUATION OF FREEZE-THAW RESISTANCE OF CONCRETE WITH BLAST-FURNACE CEMENT

**Abstract:** Different methods of testing concrete freeze resistance are described in this paper. Water absorption and freeze resistance of concrete laboratory specimens with two types of cements ordinary Portland cement CEM I 32,5R and blast-furnace cement CEM III/A 32,5R without air-entering admixture was tested. Two testing procedures were applied: direct test according to Polish standard PN-88/B-06250 and scaling measurements in the presence of de-icing salt according to Polish standard PN-EN 1338:2005. Specimens containing blast-furnace cement had lower freeze resistance regardless the applied method.

Pracę wykonano w ramach realizacji zadania statutowego S/WBIŚ/1/10 realizowanego w Politechnice Białostockiej.