

Wpływ popiołu lotnego na trwałość betonu z cementami żuźłowymi

Stosowanie dodatków mineralnych w produkcji cementu oraz betonu, takich jak: zmielony granulowany żużel wielkopiecowy oraz krzemionkowy popiół lotny, jest powszechnie znane i opisywane przez wielu autorów w literaturze. Umiejętne stosowanie dodatków mineralnych w mieszance betonowej daje szereg korzyści zarówno z ekonomicznego jak i jakościowego (trwałościowego) punktu widzenia.

1. Wprowadzenie

Zmielony granulowany żużel wielkopiecowy nie jest powszechnie stosowanym dodatkiem mineralnym do betonu, ale jest składnikiem wielu rodzajów cementów. Kształtowanie nowych właściwości betonów może się odbywać poprzez jednoczesne wprowadzanie do betonu cementów żuźlowych oraz krzemionkowych popiołów lotnych. Norma PN-EN 206-1:2003 zezwala na stosowanie popiołów lotnych zgodnych z normą PN-EN 450-1 w betonie dwuwariantowo. Jeżeli popiół lotny jest wprowadzany do mieszanki betonowej wykonanej z cementu portlandzkiego CEM I, możliwe jest uwzględnienie popiołu lotnego jako ekwiwalentu części cementu, przy podanym w normie współczynnika aktywności ($k = 0,2$ lub $k = 0,4$) i tym samym uwzględnienie części popiołu lotnego przy wyliczaniu wskaźnika W/C. Jeżeli natomiast popiół lotny jest wprowadzany do mieszanki betonowej z innymi rodzajami cementów (np. typu CEM II lub CEM III), powinien on być traktowany jako dodatek wypełniający, nieuwzględniany przy wyliczaniu W/C. Norma krajowa: PN-B-06265:2004 „Krajowe uzupełnienie PN-EN 206-1: Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność” rozszerza możliwość wprowadzenia popiołów lotnych jako ekwiwalentu części cementu i uwzględnienia ich przy wyliczaniu wskaźnika W/C na cementy typu CEM II/A-S. Nie przewidziano natomiast, możliwości wprowadzania popiołów na takich samych zasadach do cementów typu CEM II/B lub

CEM III, pomimo że w handlu znajdują się cementy tzw. wieloskładnikowe – rodzaj CEM V, mogące zawierać żużel na poziomie wyższym niż 20%. Możliwe jest wprowadzanie popiołów lotnych do betonów na zasadach innych niż podane w normie PN-EN 206-1 wtedy, gdy uzyskano pewność spełnienia założonych parametrów zarówno trwałościowych jak i wytrzymałościowych, potwierdzonych odpowiednimi badaniami. Dotyczy to zatem tylko tych spoiw i dodatków, dla których wykonano odpowiednie badania, bez możliwości zmiany spoiwa lub dodatku mineralnego w przypadku braku dodatkowego potwierdzenia spełnienia wszystkich kryteriów trwałościowych. Zagadnienie, o którym mowa, nosi nazwę betonu o równoważnych właściwościach użytkowych.

Bardzo ważna cecha betonu, określana jako jego trwałość, nie jest pojęciem uniwersalnym. Wiadomo, że kształtowanie odpowiednio wysokiej trwałości korozyjnej w środowiskach chemicznie agresywnych może prowadzić do pogorszenia innych, również istotnych jego cech w większości zastosowań betonów, np. właściwości ochronnych w stosunku do stali zbrojeniowej. Ponadto wiadomo także, że przebieg reakcji pucolanowej pomiędzy aktywnymi formami faz glinokrzemianowych zawartych w popiele lotnym a wodorotlenkiem wapniowym pochodzącym z hydrolizy krzemianów wapniowych w istotny sposób zdefiniowany jest składem chemicznym oraz fazowym popiołów. Dlatego też nie wszystkie doświadczenia w zakresie optymalizacji właściwości betonu z użyciem jednego popiołu lotnego można przenieść na popioły powstające w innych instalacjach, a już szczególnie gdy powstają ze spalania węgla pochodzącego z innego źródła.

Ponieważ zagadnienie wprowadzania popiołów lotnych do betonów, w których użyto cementów z dodatkami na poziomie klasyfikującym te cementy do grupy CEM II/B lub CEM III/A jest stosowane w niektórych krajach europejskich (np. Niemcy), dlatego też podjęto próbę poszerzenia wiedzy na ten temat

Tabela 1. Oznaczenie i skład próbek przygotowanych do badań w zakresie korozji chemicznej zapraw

Oznaczenie serii próbek	Skład zapraw dla poszczególnych serii, [g]									W/C	W/C + 0,4P)
	Cementy Rudniki, CEM			Popioły			Piasek normowy	Woda	Domieszka Isola BV		
	I 42,5R	II 32,5R	III 32,5N	Skawina	Kozienice	Dolina Odra					
RA I	450	-	-	-	-	-	1350	225	0	0,50	0,50
RA IS	347	-	-	149	-	-	1350	196	1,75	0,57	0,50
RA IK	347	-	-	-	149	-	1350	196	1,75	0,57	0,50
RA IO	347	-	-	-	-	149	1350	196	1,75	0,57	0,50
RA II	-	450	-	-	-	-	1350	225	0	0,50	0,50
RA IIS	-	347	-	149	-	-	1350	196	2,75	0,57	0,50
RA IIK	-	347	-	-	149	-	1350	196	2,75	0,57	0,50
RA IIO	-	347	-	-	-	149	1350	196	2,75	0,57	0,50
RA III	-	-	450	-	-	-	1350	225	0	0,50	0,50
RA IIIS	-	-	347	149	-	-	1350	196	3,5	0,57	0,50
RA IIIK	-	-	347	-	149	-	1350	196	3,5	0,57	0,50
RA IIIO	-	-	347	-	-	149	1350	196	3,5	0,57	0,50



Właściwości chemiczne i fizyczne	Wyniki oznaczeń dla poszczególnych popiołów		
	Skawina	Kozienice	Dolna Odra
Straty prażenia, [%]	3,46	2,37	4,44
Zawartość chlorków, Cl ⁻ , [%]	0,007	0,007	0,010
Zawartość SO ₃ , [%]	0,25	0,33	0,45
Zawartość wolnego wapna, [%]	0,00	0,00	0,06
Skład chemiczny:			
SiO ₂ , [%]	51,20	53,0	49,80
Al ₂ O ₃ , [%]	27,10	30,20	26,10
CaO, [%]	3,51	1,16	4,12
Aktywność pucolanowa:			
Wskaźnik pucolanowości po 28 dniach dojrzewania, [%]	78,70	77,16	81,30
Wskaźnik pucolanowości po 90 dniach dojrzewania, [%]	90,40	-	94,7
Pozostałość na sicie 0,045 mm, [%]	39,60	30,2	35,6
Gęstość objętościowa, [g/cm ³]	2,08	2,13	2,16

w oparciu o własne doświadczenia. Uzgodniono zatem pomiędzy CEMEX Polska a Katedrą Technologii Materiałów Budowlanych WIMiC AGH w Krakowie program badań, mający na celu ocenę chemicznej odporności korozyjnej trzech rodzajów cementów produkowanych przez Cementownię Rudniki, w tym dwóch żuźlowych, z dodatkami wskazanych popiołów lotnych. Ponadto, dla wybranych zestawów cement-popiół lotny wykonano obszerne badania mające na celu ocenę odporności mrozowej betonów, jak również ich odporności na zamrażanie i odmrażanie w obecności środka odładzającego, przy zachowaniu stałych wskaźników wodno-cementowych (z uwagi na rodzaj użytych cementów raczej wodno-spoiwowych) oraz objętościowej ilości powietrza w świeżej mieszance betonowej.

2. Wpływ dodatku popiołów lotnych na trwałość korozyjną zapraw

Badania odporności korozyjnej spoiw przeprowadzono na zaprawach z użyciem piasku normowego, przy zachowaniu stałego wskaźnika W/C, rozumianego zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 206-1 w odniesieniu do stosowania dodatków mineralnych w postaci popiołów lotnych. Założono, że niezależnie od rodzaju cementu (do badań użyto cementy typu CEM II i CEM III zawierające żużel i CEM I), wprowadzony popiół zastąpi 30% tego spoiwa.

W oparciu o wytyczne normy PN-EN 206-1 w zakresie ograniczeń ilości popiołów lotnych wprowadzanych jako spoiwo (udział popiołów lotnych nie powinien być większy niż 33% masy cementu w uzyskanym spoiwie) oraz ustaloną dla badań wartość współczynnika aktywności $k=0,4$, obliczono skład poszczególnych składników w zmodyfikowanej zaprawie normowej. Ponieważ zastąpienie 30% cementu popiołem lotnym powoduje uzyskanie wskaźnika popiół/cement = 0,43, zatem zgodnie z normą PN-EN 206-1 nadmiar popiołu do wartości tego wskaźnika wynoszącego 0,33 traktowano jako wypełniacz, o który pomniejszono udział piasku normowego.

Właściwości zapraw zawierających popioły lotne odnoszono do właściwości cementowych zapraw normowych niezawierających tego dodatku. Skład przygotowanych serii próbek przeznaczonych do badań przedstawiono w tabeli 1.

Właściwości chemiczne i fizyczne popiołów lotnych użytych do badań przedstawiono w tabeli 2. Wszystkie użyte do badań popioły lotne spełniały wymagania normy PN-EN 450.

W ramach oceny odporności korozyjnej spoiw z dodatkami popiołów lotnych wykonano badania wpływu środowiska siarczanowego oraz chlorkowego na stwardniałe zaprawy.

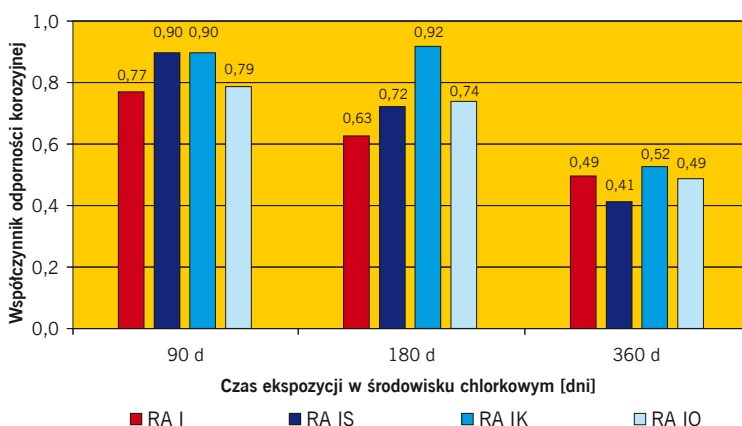
Porównanie odporności w środowisku chlorkowym

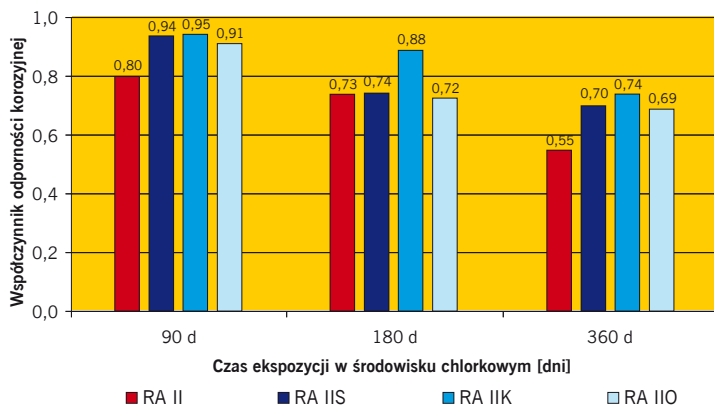
Badania odporności korozyjnej w środowisku chlorkowym wykonano metodą polegającą na określeniu cech wytrzymałościowych stwardniałych zapraw cementowych zaformowanych w postaci beleczek o wymiarach 25x25x100 mm. Próbkę tę po 28 dniach twardnienia w wodzie podzielono na dwie części, z których jedna pozostawała cały czas w wodzie, a druga została umieszczona w pojemniku z roztworem korozyjnym o składzie: 220 g NaCl/dm³, 64g MgCl₂/dm³, 14g KCl/dm³ i 14 g MgSO₄/dm³. Skład ten jest związany ze składem roztworów, jakie powstają na powierzchni jezdni polewanych środkami odładzającymi, używanymi w krajach skandynawskich, zatężanych pod wpływem oddziaływania środowiska – wiatru i słońca. Ocenę wpływu środowiska chlorkowego wykonano po 90, 180 i 360 dniach przechowywania, poprzez badanie wytrzymałości na zginanie i ściskanie, traktując wykazane różnice w stosunku do próbek świadków jako miarę odporności korozyjnej.

Wpływ popiołów lotnych na trwałość zapraw ce-

Tabela 2. Właściwości zastosowanych popiołów lotnych

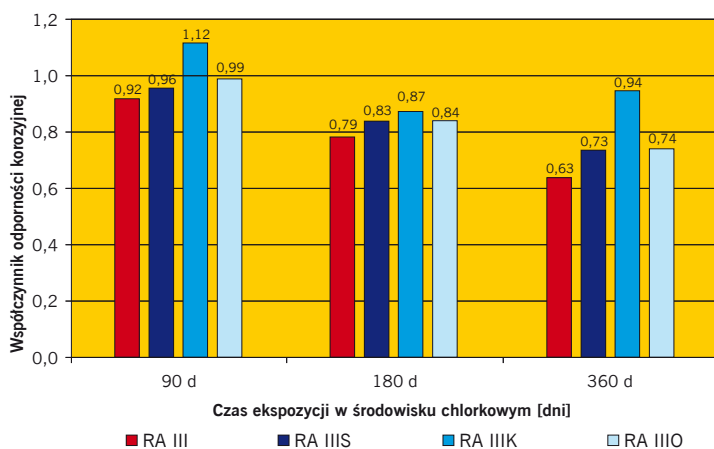
Rys. 1. „Współczynnik odporności korozyjnej” w funkcji czasu ekspozycji zapraw wykonanych na bazie cementu CEM I 42,5R w środowisku chlorkowym





Rys. 2. „Współczynnik odporności korozyjnej” w funkcji czasu ekspozycji zapraw wykonanych na bazie cementu CEM II/B-S 32,5R w środowisku chlorkowym

mentowych w środowisku chlorkowym na podstawie uzyskanych wyników badań zaprezentowano na rysunkach 1, 2 i 3. Wartości „współczynników odporności korozyjnej” zapraw po odpowiednim czasie ekspozycji w środowisku chlorkowym obliczono

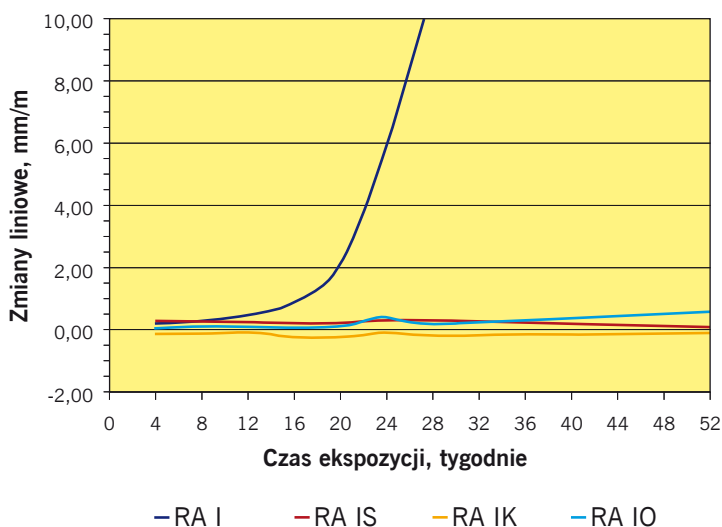


Rys. 3. „Współczynnik odporności korozyjnej” w funkcji czasu ekspozycji zapraw wykonanych na bazie cementu CEM III/A 32,5N w środowisku chlorkowym

jako iloraz wytrzymałości na ściskanie zapraw przechowywanych w środowisku korozyjnym do wytrzymałości zapraw przechowywanych w wodzie. Poza zasadniczym celem badań jeszcze raz potwierdzono wyższą odporność korozyjną cementów zawierających granulowany żużel wielkopiecowy, czyli CEM II/B-S oraz CEM III/A w stosunku do cementu CEM I.

Wprowadzenie popiołu lotnego jako składnika spoiwa spowodowało praktycznie w każdym przypadku wzrost odporności korozyjnej na oddziaływanie

Rys. 4. Zmiany liniowe próbek z zapraw cementowych na bazie cementu CEM I i dodatków popiołów lotnych, poddanych oddziaływaniu środowiska siarczanowego



środowiska chlorkowego. Świadczą o tym wartości obliczonych „współczynników odporności korozyjnej”, które niezależnie od rodzaju użytego popiołu lotnego w każdym przypadku są wyższe niż dla cementu wyjściowego – włącznie z cementem CEM II/B-S i CEM III/A.

Podobną prawidłowość obserwuje się porównując „współczynniki odporności korozyjnej” w środowisku chlorkowym obliczone dla wytrzymałości na zginanie zapraw podanych w tabeli 1. Wprowadzenie popiołu lotnego jako zamiennika części cementu do badanych zapraw w każdym przypadku powodowało wzrost „współczynnika odporności korozyjnej” niezależnie od rodzaju cementu: CEM I 42,5R; CEM II/B-S 32,5R; CEM III/A 32,5N.

Porównanie odporności w środowisku siarczanowym

Odporność korozyjną w środowisku siarczanowym oznaczono w oparciu o normę PN-B-19707:2003 „Cement. Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności”, przez pomiar zmian liniowych próbek dojrzewających w roztworze Na_2SO_4 o stężeniu $16 \text{ g SO}_2^{-4}/\text{l}$, w stosunku do zmian liniowych takiej samej zaprawy przechowywanej w wodzie.

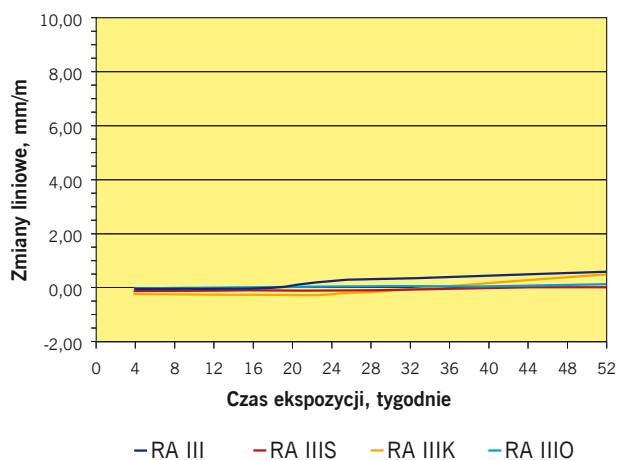
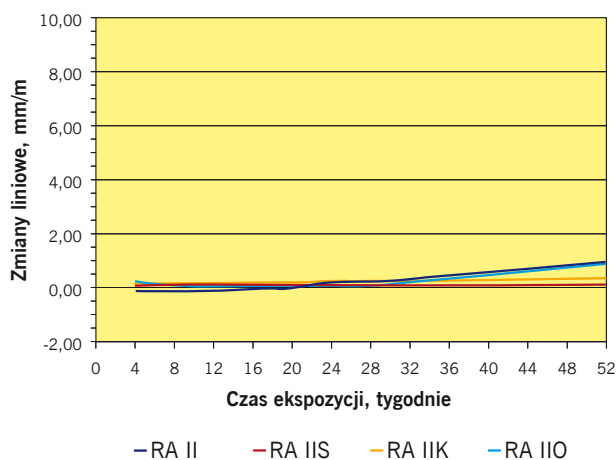
Uzyskane wyniki wpływu popiołów lotnych na trwałość zapraw w środowisku siarczanowym zaprezentowano na rysunkach 4 i 5. Rysunki przedstawiają zmiany liniowe zapraw poddanych działaniu środowiska siarczanowego względem zmian liniowych próbek przechowywanych w wodzie, w łącznym czasie ekspozycji wynoszącym 52 tygodnie.

Prezentowane wyniki potwierdzają wyższą trwałość beleczek wykonanych z cementów zawierających dodatek żużla wielkopiecowego w porównaniu z beleczkami wykonanymi z cementu CEM I. Dodatek popiołów lotnych (zastąpienie 30% masy cementu popiołem lotnym) zdecydowanie wpłynęło na poprawę odporności siarczanowej stwardniałej zaprawy wykonanej z cementu CEM I, tak że w oparciu o uzyskane wyniki badań można stwierdzić uzyskanie spoiwa praktycznie odpornego na ten rodzaj środowiska korozyjnego.

Wprowadzenie popiołów lotnych do cementów zawierających wyjściowo granulowany żużel wielkopiecowy (zarówno CEM II/B-S jak również CEM III/A) nie wpłynęło istotnie na zmianę trwałości beleczek w środowisku siarczanowym. Próbkę zawierającą popioły zachowują się praktycznie analogicznie do próbek z żużlowego cementu bazowego.

Zgodnie z wymaganiami normy PN-B-19707:2003 „Cement. Cement specjalny. Skład, wymagania i ocena zgodności”, jako kryterium cementów o dużej odporności na siarczan uznaje się te spoiwa, których zaprawy wykazują zmiany liniowe nieprzekraczające $0,5\%$ (5 mm/m) po 52 tygodniach przechowywania w siarczanowym roztworze korozyjnym. Jak widać, tego warunku nie spełnia tylko zaprawa na czystym cementu CEM I 42,5R.

Na rysunku 6 przedstawiono dwa obrazy z elektronowego mikroskopu skaningowego, obrazujące próbkę zaprawy RA I (na bazie cementu CEM I bez dodatku popiołów) po 180 dniach ekspozycji w środowisku siarczanowym. Widoczne są produkty korozji w postaci ettringitu oraz gipsu, których powstanie spowodowało zniszczenie próbki, wykazane zmianami liniowymi przedstawionymi na rysunku 4.



3. Wpływ dodatku popiołów lotnych na trwałość mrozową betonów

W celu określenia wpływu dodatku popiołu lotnego (30% masy cementu) na trwałość mrozową betonów wykonanych w oparciu o trzy rodzaje cementów, tj. CEM I 42,5R, CEM II/B-S 32,5R oraz CEM III/A 32,5N, przygotowano dwie grupy betonów o dwóch różnych wskaźnikach wodno-cementowych, W/C = 0,5 i 0,45. Przy wyliczeniu wskaźnika W/C uwzględniono obecność popiołu przez przyjęcie stałej $k = 0,4$ (wg sposobu proponowanego dla cementu CEM I 42,5 wg normy PN-EN 206-1) niezależnie od rodzaju użytego cementu. Ponieważ przyjęcie takich założeń wychodzi poza zakres normy odnośnie zaleceń dla zapewnienia odpowiedniej trwałości betonu, dlatego też badania mają charakter sprawdzenia, czy uzyskane betony wykazują równoważne właściwości użytkowe w odniesieniu do składu wyjściowego, niezawierającego popiołów. Czynnikiem mającym zapewnić odpowiednią trwałość mrozową betonów było napowietrzenie mieszanki betonowej do poziomu ok. 6% za pomocą wprowadzonej domieszki napowietrzającej.

Zasadniczym przedmiotem badań było sprawdzenie wpływu dodanych popiołów lotnych na mrozoodporność oznaczoną metodą zwykłą, zgodnie z normą PN-88/B-06250 dla wskaźnika mrozoodporności F150. Badaniom w tym zakresie poddano betony o wskaźniku W/C = 0,5 po różnym czasie dojrzewania, między 60. a 90. dniem.

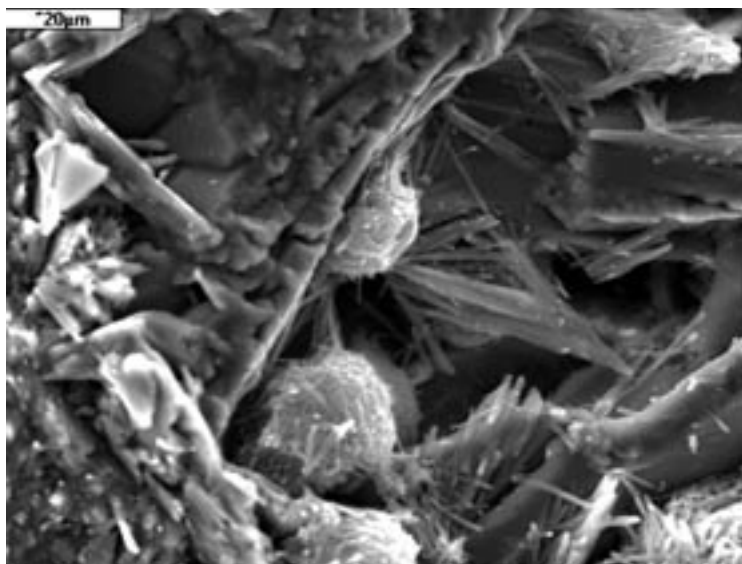
Drugim celem badań było sprawdzenie wpływu popiołów lotnych na trwałość betonu w warunkach zamrażania i odmrażania, przy stałym dostępie środka odladzającego w postaci 3% roztworu NaCl. Z uwagi na to, że trwałość betonu w takich warunkach wymaga wyższych parametrów użytkowych, przyjęto wskaźnik W/C = 0,45, jak dla klasy ekspozycji XF4. Badanie przeprowadzono wg normy ENV 12390-9. Przewidziano 28 cykli badawczych zamrażania i odmrażania, uznając, że pozwolą one na wyciągnięcie dodatkowych wniosków w oparciu o kryteria zawarte w pierwowzorze normy czynnościowej ENV 12390-9, tj. SS 13 72 44.

Skład mieszanek betonowych został ustalony w oparciu o recepty wykorzystywane do przemysłowej produkcji betonów, z modyfikacjami wynikającymi z wprowadzania popiołu i uzyskiwania zmienionych gęstości świeżej mieszanki. Do wykonania mieszanek wykorzystano dwie domieszki, jedną o właściwościach upłynnających i drugą – domieszkę napowie-

trzającą. Jako kruszywo zastosowano przekruszone żwiry o dwóch frakcjach 2/8 mm i 8/16 mm wraz z piaskiem o uziarnieniu 0/2 mm. Z istotnych parametrów zastosowanych kruszyw ustalono, w oparciu o dostarczone wyniki badań kruszyw, że charakteryzują się one odpornością na działanie mrozu.

W tabeli 3 przedstawiono oznaczenia i składy mieszanek betonowych o wskaźniku W/C = 0,5, nato-

Rys. 5. Zmiany liniowe próbek z zapraw cementowych na bazie cementu CEM II/B-S (po lewej) i CEM III/A (po prawej) z dodatkami popiołów lotnych, poddanych oddziaływaniu środowiska siarczanowego



Rys. 6. Analiza SEM przekroju próbki RA I, na czystym spoiwie CEM I 42,5R. Powyżej produkty korozji – kryształy o budowie słupkowej – ettringit. Na dolnym obrazie widoczne kryształy powstałego gipsu

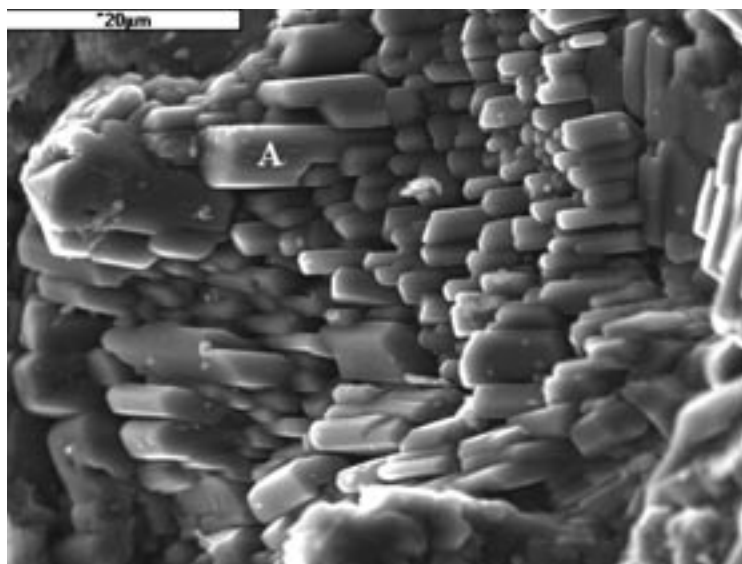


Tabela 3. Skład betonów o wskaźniku W/C = 0,5

Oznaczenie betonu	Masa poszczególnych składników mieszanki betonowej, [kg/m ³]									Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Zawartość powietrza, [%]	
	Cement			Popiół	Piasek	Żwir 2/8	Żwir 8/16	Domieszki				Woda
	CEM I	CEM II	CEM III	Skawina	Borzęcin	Radłów	Radłów	BV	LP			
R1S	325	-	-	97	668	409	563	2,52	0,25	182	2248	6,0
R2S	-	320	-	96	658	403	554	2,52	0,22	179	2214	7,0
R3S	-	-	319	95	655	401	552	2,52	0,23	179	2205	7,0
R1	362	-	-	-	699	428	589	2,52	0,22	181	2264	6,0
R2	-	360	-	-	695	426	586	2,52	0,18	180	2250	6,0
R3	-	-	358	-	691	423	582	2,88	0,22	179	2236	6,5

Tabela 4. Skład betonów o wskaźniku W/C = 0,45

Oznaczenie betonu	Masa poszczególnych składników mieszanki betonowej, [kg/m ³]									Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Zawartość powietrza, [%]	
	Cement			Popiół	Piasek	Żwir 2/8	Żwir 8/16	Domieszki				Woda
	CEM I	CEM II	CEM III	Skawina	Borzęcin	Radłów	Radłów	BV	LP			
R1Ss	351	-	-	105	633	388	529	2,80	0,24	177	2186	7,0
R2Ss	-	357	-	107	642	394	537	2,80	0,24	180	2220	6,5
R3Ss	-	-	358	107	644	395	539	4,80	0,36	180	2226	6,5
R1s	400	-	-	-	684	419	571	2,80	0,24	180	2259	6,0
R2s	-	402	-	-	687	422	574	2,80	0,20	181	2270	6,0
R3s	-	-	399	-	682	418	570	3,20	0,24	180	2253	6,5

miast w tabeli 4 o wskaźniku W/C = 0,45. Należy zwrócić uwagę, że ilości domieszek (upłynniającej i napowietrzającej), z uwagi na zmiany reologiczne i konieczność uzyskania założonych parametrów, były zmieniane. Przygotowane betony z dodatkiem popiołu lotnego miały próbki odniesienia bez popiołów, ale z ilością cementu odpowiadającą jego przeliczeniowej zawartości wynikającej z zapisów normy PN-EN 206-1.

Oceny mrozoodporności betonów charakteryzujących się wskaźnikiem W/C = 0,5 dokonano w oparciu o wyniki badań wytrzymałości na ściskanie po zakończeniu 150 cykli zamrażania i odmrażania, odniesionych do wytrzymałości próbek przechowywanych w wodzie w roli świadków.

Zasadniczym celem przeprowadzonych badań było ustalenie, czy zachowany jest zbliżony poziom mrozoodporności betonów po wprowadzeniu do składu surowcowego zawierającego różne rodzaje cementów wybranego popiołu lotnego. Zachowanie stałego poziomu napowietrzenia betonów z popiołem lotnym oraz betonów odniesienia (niezawierających popiołu), jak również zachowanie tego samego, stałego wskaźnika W/C (przy k = 0,4 dla wszystkich

rodzajów cementów CEM I; CEM II/B-S; CEM III/A), pozwala na uzyskanie porównywalnego poziomu mrozoodporności. Uzyskane wyniki badań mrozoodporności zwykłej przedstawiono w tabeli 5.

Oceny odporności betonów na oddziaływanie 3% roztworu NaCl w czasie zamrażania i odmrażania dokonano dla serii próbek betonowych o wskaźniku W/C = 0,45. W tabeli 6 przedstawiono wyniki oznaczeń dla poszczególnych serii betonów po 28 cyklach badawczych oraz prognozowane rezultaty badań po 56 cyklach, wykorzystane do oceny klasy mrozoodporności zgodnie z normą SS 13 72 44. Kryteria do oceny klasy mrozoodporności betonów przedstawia tabela 7.

W oparciu o uzyskane wyniki można stwierdzić, że obecność popiołu lotnego w składzie mieszanki betonowej wpływa na pogorszenie trwałości betonu na zamrażanie i odmrażanie w środowisku środków odładających przy zachowaniu praktycznie niezmiennych pozostałych parametrów betonu. Oczywiście nie sama obecność popiołów lotnych może mieć wpływ na uzyskanie takich wyników badań, ale ich wpływ na charakterystykę porów powietrznych wprowadzonych przez domieszkę napowietrzającą. Jednak ten obszar nie został poruszony w prowadzonych badaniach. Ponadto nie został ustalony także związek pomiędzy wiekiem betonu a jego trwałością mrozową, bowiem wymagałoby to zwielokrotnienia badań. Należy pamiętać, że wprowadzenie znacznej ilości popiołów lotnych do betonów z cementami żuźlowymi wydłuża w znacznym stopniu czas efektywnego zakończenia procesów twardnienia takich betonów, a zatem „dojrzałość” betonu poddanego badaniom może mieć wpływ na uzyskane rezultaty. Prezentowane wyniki badań dotyczą betonów dojrzwających wstępnie 28 do 45 dni.

Najbardziej wyraźny wpływ popiołów lotnych zaznacza się w przypadku zastosowania cementu CEM I 42,5R, jednak tylko wtedy, gdy wyniki od-

Tabela 5. Wyniki badań mrozoodporności betonów metodą zwykłą po 150 cyklach zamrażania i odmrażania

Oznaczenie serii betonu	Wiek próbek w chwili rozpoczęcia badań, [dni]	Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek świadków, [MPa]	Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek po 150 cyklach zamrażania, [MPa]	Spadek wytrzymałości na ściskanie betonu poddanego badaniu, [%]	Zmiana masy próbek poddanych zamrażaniu ΔG, [%]
R1S	91	61,0	62,0	-1,56	-0,27
R1	89	64,6	52,6	18,55	-0,18
R2S	87	63,6	61,0	4,07	-0,34
R2	82	55,3	53,7	2,90	-0,40
R3S	71	58,2	56,6	2,81	-0,31
R3	70	54,0	51,0	5,50	-0,36

Tabela 6. Wyniki oznaczenia masy złuszczonego materiału po 28 cyklach zamrażania i odmrażania w obecności środków odladzających, wraz z prognozowanymi wynikami dla 56 cykli badawczych

Oznaczenie serii betonu	Masa zebranego uszkodzonego materiału po czasie ekspozycji 28 dni, wartość średnia, [kg/m ²]	Prognozowana masa złuszczonego materiału po 56 cyklach, [kg/m ²]	Szacowana klasa mrozoodporności
	m ₂₈	m ₅₆ = 2 • m ₂₈	
R1Ss (CEM I + popiół)	0,24	0,48	dobra
R1s (CEM I)	0,12	0,24	dobra
R2Ss (CEM II + popiół)	0,97	1,94	niedostateczna
R2s (CEM II)	0,78	1,56	niedostateczna
R3Ss (CEM III + popiół)	1,24	2,48	niedostateczna
R3s (CEM III)	1,18	2,36	niedostateczna



nieść do betonu bez dodatku popiołu lotnego (różnice względne). Patrząc na wszystkie serie równocześnie można stwierdzić, że masa złuszczonego materiału zwiększa się o porównywalną wielkość po wprowadzeniu popiołu, niezależnie od rodzaju zastosowanego cementu.

Zgodnie z przedstawionymi kryteriami, beton na bazie cementu CEM I można zakwalifikować wstępnie do klasy mrozoodporności „dobrej”, i choć obecność popiołu lotnego wpływa na pogorszenie trwałości, to jednak nie zmienia to klasy mrozoodporności. W przypadku betonów na bazie cementów żuźlowych uzyskane wyniki badań mieszczą się w klasie mrozoodporności niedostatecznej. Zapewne jednym z elementów uzyskania negatywnych rezultatów badań, poza wspomnianą już strukturą porów nieoznaczoną w ramach realizacji programu, jest mniejsza „dojrzałość” betonów zawierających żużel wielkopiecowy.

4. Podsumowanie

Jak można się było spodziewać, wprowadzenie popiołów lotnych do betonów na bazie różnych rodzajów cementów ma zarówno pozytywne jak i negatywne skutki. Wykazano, że w obecności popiołów lotnych uzyskuje się zdecydowaną poprawę trwałości zarówno w środowisku siarczanowym jak i chlorokowym (mogą to być klasy ekspozycji: XD1÷3; XS1÷3; XA1÷3 wg normy PN-EN 206-1). Praktycznie nie stwierdzono wpływu wprowadzonych popiołów lotnych na trwałość mrozową ocenianą metodą zwykłą w zakresie wskaźnika mrozoodporności

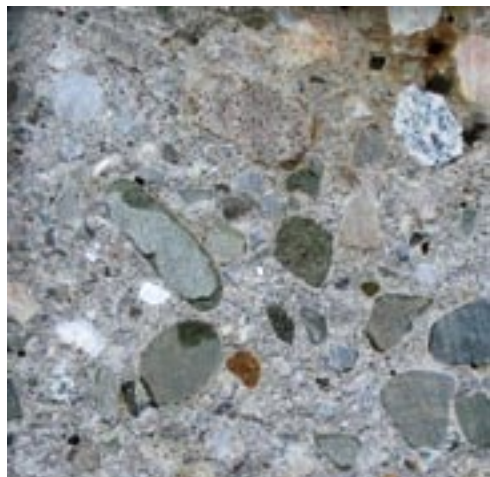
F150 zgodnie z normą PN-88/B-06250 (mogą to być klasy ekspozycji: XF1 i XF3 wg normy PN-EN 206-1). Ponadto, stwierdzono negatywny wpływ na trwałość betonów w środowisku charakteryzującym się zamrażaniem i odmrażaniem w obecności środków odladzających, choć waga tego wpływu zależy od trwałości w tym zakresie betonu, względem którego odnoszone są wyniki badań (mogą to być klasy ekspozycji: XF2 i XF4 wg normy PN-EN 206-1).

dr inż. Artur Łagosz
AGH w Krakowie

Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
Katedra Technologii Materiałów Budowlanych
mgr inż. Rafał Gajewski
CEMEX Polska Sp. z o.o.

Literatura

- 1 W. Kurdowski, *Chemia cementu*, PWN, W-wa 1991
- 2 W. Kurdowski, *Dodatki mineralne do cementu a trwałość betonu*, „Cement, Wapno, Gips” 6/1991
- 3 S. Chłędziński, *Praca doktorska*, AGH, Kraków 2000
- 4 S. Chłędziński, *Odporność cementu na agresję siarczanową w świetle badań długoterminowych*, Konferencja „Dni Betonu”, Polski Cement, Wiśta 2004
- 5 S. Chłędziński, „Cement, Wapno, Beton”
- 6 J. Wawrzeńczyk, *Wpływ dodatku popiołu lotnego na mrozoodporność betonu*, s 479-488, Konferencja „Dni Betonu”, Polski Cement, 2002
- 7 PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania właściwości, produkcja i zgodność
- 8 Z. Giergiczny, J. Małolepszy, J. Śliwiński, J. Szwabowski, *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*, Inst. Śląski, Opole 2002
- 9 F. Massazza, U. Costa, *Aspects of the pozzolanic activity and properties of pozzolanic cements*, *Il Cemento*, 76, No. 1, s. 3018 (1979)



Klasa mrozoodporności	Wymagania	
bardzo dobra	M ₅₆ < 0,1 kg/m ²	
dobra	A	M ₅₆ < 0,2 kg/m ²
	lub B:	M ₅₆ < 0,5 kg/m ² i M ₅₆ /M ₂₈ < 2
	lub C:	M ₁₁₂ < 0,5 kg/m ²
dostateczna	A	M ₅₆ < 1,0 kg/m ² i M ₅₆ /M ₂₈ < 2
	lub B:	M ₁₁₂ < 1,0 kg/m ²
niedostateczna	jeżeli niespełnione są wymagania mrozoodporności dostatecznej	

Tabela 7. Kryteria oceny wyników mrozoodporności betonu według normy szwedzkiej SS 13 72 44