

MICHAŁ A. GLINICKI, DARIA JÓŹWIAK-NIEDŹWIEDZKA,
KAROLINA GIBAS

Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Polska Akademia Nauk
ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa

OCENA PRZEPUSZCZALNOŚCI BETONU Z POPIOŁEM LOTNYM WAPNIOWYM – KONCEPCJA BADAŃ

STRESZCZENIE

Celem rozpoczętych badań jest ocena przepuszczalności betonu zawierającego popiół lotny wapienny pochodzący ze spalania węgla brunatnego w energetyce zawodowej, w szczególności jakościowe rozpoznanie i określenie ilościowe wpływu składnika popiołowego w cemencie lub dodatku popiołu do betonu na wnikanie mediów agresywnych. W referacie przedstawiono podstawowe koncepcje badawcze oraz wyniki określania szczelności betonu na podstawie literatury. Stwierdzono, że można oczekiwać korzystnych efektów stosowania popiołu lotnego wapiennego, ujawniających się znaczącą redukcją współczynnika dyfuzji i współczynnika migracji chlorków, a także efektów niekorzystnych polegających na zwiększeniu przepuszczalności powietrza i ewentualnie podwyższeniu szybkości karbonatyzacji.

1. WSTĘP

Przepuszczalność betonu uznaje się za jedną z podstawowych cech umożliwiających przewidywanie i ocenę jego trwałości w środowiskach agresywnych. Przenikanie agresywnych mediów ciekłych i gazowych może prowadzić do korozji zbrojenia stalowego i wywoływać zniszczenie konstrukcji żelbetowych. Metody określania przepuszczalności mediów ciekłych i gazowych przez beton nie są jednak powszechnie uznane, kryteria oceny wyników nie są uzgodnione. Dotyczy to również betonów modyfikowanych dodatkami mineralnymi, normowymi i pozanormowymi, a także betonów na cementach wieloskładnikowych coraz szerzej wprowadzanych na rynek.

Tematem badań rozpoczętych w ramach Projektu POIG są nowe spoiwa cementowe z popiołem lotnym wapiennym. W zakresie badań mieści się stosowanie popiołu lotnego wapiennego jako dodatku do betonu oraz jako składnika głównego cementów wieloskładnikowych. Celem zamierzonych badań, przedstawionych w tym referacie, jest ocena przepuszczalności betonu zawierającego popiół lotny wapienny, w szczególności jakościowe rozpoznanie i określenie ilościowe wpływu składnika popiołowego w cemencie lub dodatku popiołu do betonu na wnikanie mediów agresywnych.

Popioły lotne wapienne są ubocznym produktem spalania węgla brunatnego w energetyce zawodowej. W Polsce popioły wapienne, powstające w elektrowniach Bełchatów, Pątnów-Adamów-Konin oraz Turów, pochodzą ze spalania węgla w kotłach pyłowych oraz w kotłach fluidalnych. Skład chemiczny i mineralny oraz właściwości fizyczne krajowych popiołów lotnych wapiennych były przedmiotem badań Giergiczego [1], ale zagadnienia trwałości betonu z takimi dodatkami popiołowymi wymagają dalszych badań. W referacie przedstawiono podstawowe koncepcje badawcze oraz wyniki określenia szczelności betonu zawierającego popiół lotny wapienny na podstawie literatury.

2. METODY BADAŃ

2.1 Uwagi ogólne

Tradycyjnie, trwałość betonu uzależnia się od wytrzymałości betonu na ściskanie. Takie założenie jest podstawą recepturowego podejścia do zagadnień trwałości, polegającego na określeniu rodzajów i granicznych zawartości składników mieszanki betonowej przeznaczonej do stosowania w określonych warunkach agresywnego oddziaływania środowiska. Jednak nie zawsze wysoka wytrzymałość betonu daje gwarancję dużej jego trwałości, decyduje tu struktura i mikrostruktura samego stwardniałego zaczynu, w tym mikrostruktura porów, jak i rodzaj i właściwości zastosowanego kruszywa. Współczesne koncepcje projektowania betonu na trwałość opracowano m.in. w ramach europejskich projektów badawczych DuraCrete czy ClinConc. Baroghel-Bouny, [2] zaproponowała zestaw uniwersalnych wskaźników trwałości betonu w środowisku agresji chlorków i karbonatyzacji. Klasy

potencjalnej trwałości betonu zdefiniowano na podstawie parametrów określających przenikanie cieczy i gazów przez beton, tj.:

- współczynnika dyfuzji chlorków (efektywnego) D_{eff} , określanego na podstawie pierwszego prawa Ficka,
- współczynnika dyfuzji chlorków (pozornego), określanego według drugiego prawa Ficka,
- na podstawie badania migracji wymuszonej polem elektrycznym $D_{\text{app(mig)}}$ albo na podstawie badania dyfuzji w stanie ustalonym lub nieustalonym $D_{\text{app(dif)}}$,
- współczynnika gazoprzepuszczalności $K_{\text{app(gas)}}$, mierzonego metodą Cembureau przy ciśnieniu wejściowym 0,2 MPa na próbkach wysuszonych w temperaturze $105 \pm 5^\circ\text{C}$,
- współczynnika wodoprzepuszczalności na podstawie bezpośredniego pomiaru przepływu po nasyceniu próbek,
- porowatości otwartej.

Określenie ilościowego przenikania jonów pozwala na przewidywanie trwałości zbrojenia stalowego w konstrukcjach żelbetowych. Na podstawie współczynnika przepuszczalności powietrza przez beton można określić odporność betonu w warstwie otuliny zbrojenia na karbonatyzację. Przepuszczalność wody przez beton odpowiada ekspozycji elementów konstrukcji na oddziaływanie wody pod ciśnieniem i jest również ważną cechą świadczącą o podatności mikrostruktury betonu na penetrację mediów agresywnych. Poniżej opisano metody badawcze stosowane w IPPT PAN do oceny przepuszczalności betonów.

2.2 Migracja jonów chlorkowych

Współczynnik migracji chlorków określany jest wg przyspieszonej metody NT Build 492 [3]. Metoda ta polega na określeniu współczynnika migracji chlorków przy nieustalonym ich przepływie. Betonowe próbki, wcześniej odpowiednio przygotowane, umieszcza się w komorze pomiarowej między miedzianymi elektrodami. W jednej z dwóch przeciwległych części komory znajduje się 10% roztwór NaCl, w drugiej - $0,3 \text{ mol/dm}^3$ roztwór NaOH. Między elektrodami przepływa

prądu o napięciu w zakresie od 10 do 60 V. Wartość współczynnika migracji chlorków wyznacza się na podstawie wielkości przyłożonego napięcia, temperatury anolitu mierzonej na początku i końcu badania oraz głębokości na jaką wniknęły jony chlorkowe, mierzonej na osiowo rozłupanej próbce, Józwiak-Niedźwiedzka [4]. Kryteria oceny współczynnika migracji chlorków badanego po 28 dniach dojrzewania betonu przedstawione są w Tabeli 1.

Tabela 1.

Ocena odporności betonu na wnikanie chlorków, NT Build 492

| Współczynnik migracji | Odporność na wnikanie chlorków |
|---|--------------------------------|
| $< 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ | Bardzo dobra |
| $2 - 8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ | Dobra |
| $8 - 16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ | Dopuszczalna |
| $> 16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ | Niedopuszczalna |

2.3 Przepuszczalność powietrza przez beton

Określenie przepuszczalności powietrza przez beton wykonuje się metodą nieniszcząca przy użyciu aparatury Torrent Permeability Teseter produkcji szwajcarskiej, Torrent [5]. Zestaw aparatury składa się z dwukomorowej głowicy, pompy próżniowej o wydajności 1,5 m³/h, presostatu, systemu przewodów z zaworami, układu mierzącego ciśnienie oraz elektronicznego układu liczącego wartość współczynnika przepuszczalności powietrza kT. Głowica aparatu składa się z dwóch współśrodkowych komór: wewnętrznej o średnicy 32 mm oraz zewnętrznej o średnicy 86mm. Komora wewnętrzna jest komorą pomiarową, zaś zewnętrzna służy do wyeliminowania efektów brzegowych oraz zapewnia przepływ strumienia powietrza przez powierzchnie przekroju komory wewnętrznej. Presostat jest urządzeniem utrzymującym w komorze zewnętrznej takie samo ciśnienie jak w komorze wewnętrznej. W takich warunkach można przyjąć, że w komorze wewnętrznej przepływ powietrza odbywa się przez określoną powierzchnię (przekrój poprzeczny komory), że jest on do tej powierzchni prostopadły oraz wolny od zaburzeń spowodowanych przepływem poza tym przekrojem.

W przypadku zaleconego badania w stanie powietrzno-suchym przyjmuje się pięciostopniową ocenę jakości betonu z uwagi na gazoprzepuszczalność, opartą

na podstawie wyznaczonego współczynnika przepuszczalności powietrza kT . Kryteria klasyfikacji podano w Tabeli 2.

Tabela 2.

Klasy jakości betonu z uwagi na przepuszczalność powietrza

| Klasa | Wartość kT (10^{-16} m^2) | Jakość (trwałość) |
|-------|---|-------------------|
| 1 | $< 0,01$ | Bardzo dobra |
| 2 | $0,01 - 0,1$ | Dobra |
| 3 | $0,1 - 1,0$ | Przeciętna |
| 4 | $1,0 - 10,0$ | Zła |
| 5 | $> 1,0$ | Bardzo zła |

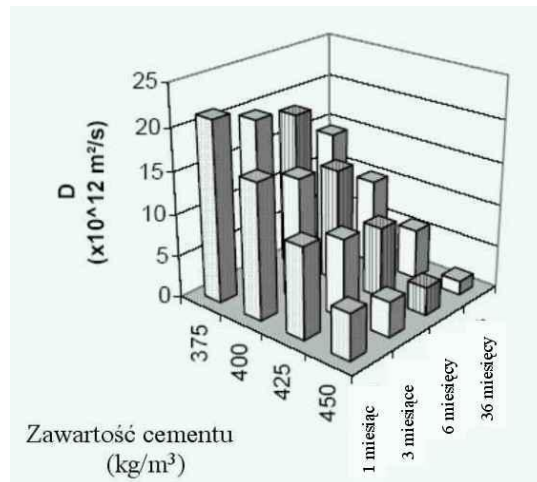
2.4 Inne metody badawcze

Oprócz normowej metody określenia głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wg PN-EN 12390-8: 2009 stosuje się metodę obserwacji mikrostruktury betonu na cienkich szlifach. Informacje pochodzące z obserwacji cienkich szlifów betonowych (gr. $20 \mu\text{m}$) w optycznym mikroskopie przy zastosowaniu fluorescencji, a także światła przechodzącego pozwalają na ocenę mikrostruktury betonu. Obraz cienkich szlifów w świetle UV dostarcza informacji o jakości zaczynu i kruszywa, systemie porów powietrznych, defektach struktury jak np. rysy, ich wielkości i rozmieszczeniu oraz stosunku wodno-spoiwowym. Z otrzymanych informacji można wnioskować o jakości betonu ze względu na jego szczelność, a także o przewidywanej trwałości danej konstrukcji.

3. ODPORNOŚĆ BETONU NA PRZENIKANIE JONÓW CHLORKOWYCH

3.1 Wpływ dodatków mineralnych

Największy wpływ na przenikalność jonów chlorkowych w betonie ma współczynnik wodno-spoiwowy w/s , Hansson et al. [6], Fukute et al. [7]. Wraz z obniżaniem w/s zmniejsza się również wartość współczynnika migracji chlorków. Jest to związane z redukcją porowatości, a w szczególności porowatości kapilarnej. W betonach o jednakowym wskaźniku $w/c=0,4$ (Rys. 1) zaobserwowano zależność współczynnika migracji chlorków od zawartości cementu i wieku betonu. W betonach o takiej samej zawartości cementu i takim samym w/c współczynnik D w $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ badany po miesiącu i po 3 latach zmniejsza się około o 4 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$).



Persson [8]

Ryc. 1. Współczynnik migracji chlorków w betonie o $w/c=0,4$ w zależności od zawartości cementu i wieku betonów; betony samozagęszczalne na cemencie portlandzkim

Przeprowadzone badania doświadczalne Elahi i in., [9] dotyczyły wytrzymałości m.in. dyfuzji chlorków, gazoprzepuszczalności i absorpcji wody w betonie modyfikowanym różnymi dodatkami mineralnymi, w tym popiołem lotnym krzemionkowym, zastępującym do 40% masy cementu. Stwierdzono korzystny wpływ popiołu lotnego na szczelność betonu.

3.2 Wpływ fluidalnych popiołów lotnych

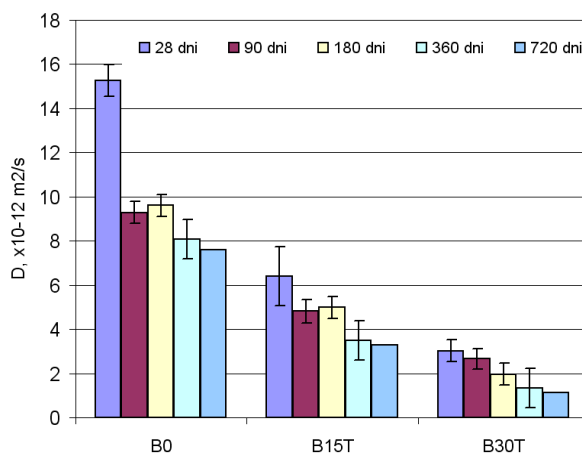
Badania Józwiak-Niedźwiedzkiej [4] dotyczyły wpływu fluidalnego popiołu lotnego z spalania węgla brunatnego na współczynnik migracji chlorków. W składzie popiołu fluidalnego z elektrowni Turów wyróżniono m.in. następujące składniki: SiO_2 – 36,47%, CaO -19,36%, SO_3 – 3,90%, MgO -2,03%, CaO wolne-4,75% oraz straty prażenia wynoszące 2,73%. Mieszanki betonowe serii B i C wykonano przy stałym stosunku wodno-spoiwowym, wynoszącym 0,45. Zastosowano domieszki chemiczne: uplastyczniającą na bazie lignosulfonianów magnezowych; superplastyfikator na bazie eterów polikarboksyłowych oraz napowietrzającą na bazie tensydów syntetycznych. Skład mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 3. Wyniki określenia współczynnika migracji chlorków pokazano na rysunkach 2 i 3.

Tabela 3.

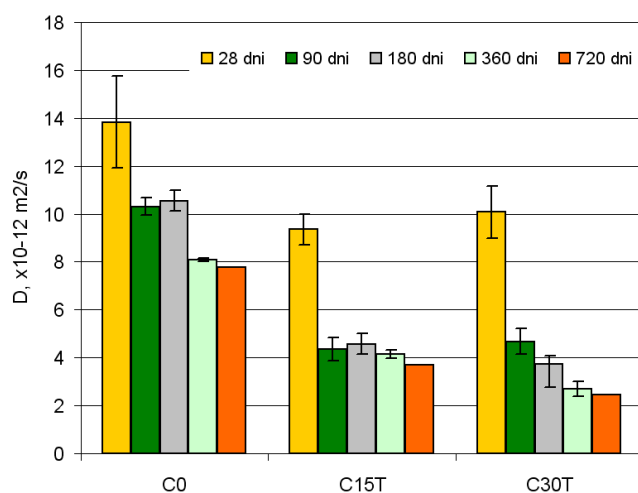
Skład mieszanek betonowych w kg/m^3 : seria B – betony nienapowietrzone,
seria C – betony napowietrzone

| Skład \ Seria | B0 | B15T | B30T | C0 | C15T | C30T |
|----------------------------|-----|------|------|-----|------|------|
| Cement CEM I 32,5R | 360 | 306 | 252 | 380 | 323 | 266 |
| Popiół fluidalny Turów (T) | - | 54 | 108 | - | 57 | 114 |
| Woda | 162 | 162 | 162 | 171 | 171 | 171 |
| Piasek 0-2 mm | 595 | 592 | 589 | 583 | 579 | 576 |
| Żwir 2-8 mm | 706 | 703 | 700 | 692 | 688 | 684 |
| Żwir 8-16 mm | 558 | 555 | 552 | 547 | 543 | 540 |
| Plastyfikator | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,4 | 3,4 | 3,4 |
| Superplastyfikator | 4,3 | 4,7 | 5,6 | 2,7 | 3,8 | 4,8 |
| Środek napowietrzający | - | - | - | 0,4 | 0,6 | 0,6 |

Największe wartości współczynnika migracji chlorków wykazały betony bez popiołu fluidalnego nienapowietrzone i napowietrzone (zaledwie dopuszczalna odporność na wnikanie chlorków). W betonach z popiołem fluidalnym z elektrowni Turów tylko po 180 dniach z zastąpieniem 30% cementu stwierdzono mniejszy współczynnik migracji chlorków niż w betonie z 15% popiołu fluidalnego. Stwierdzono, że dodatek popiołu fluidalnego o zawartości CaO bliskiej 20% wpływa korzystnie na odporność betonu na przenikanie jonów chlorkowych.



Ryc. 2. Współczynnik migracji chlorków badany po 28, 90, 180, 360 i 720 dniach, seria B



Ryc. 3. Współczynnik migracji chlorków badany po 28, 90, 180, 360 i 720 dniach, seria C

3.3 Wpływ popiołów lotnych wapiennych

Papadakis oraz Tsimas [10] przeprowadzili badania przepuszczalności jonów chlorkowych na zaprawach zawierających:

- popiół lotny wapienny, pochodzący z greckiej elektrowni w Ptolemais (oznaczony dalej jako FH, którego analizę chemiczną podano w Tabeli 4),
- cement portlandzki CEMI 52,5R,
- kruszywo: wapień drobny (37%), średni (21%) i gruby (42%),
- superplastyfikator (0,5%).

Tabela 4.

Analiza chemiczna popiołu lotnego wapiennego FH, [10]

| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | SiO ₂ aktywne |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|-------|------------------|-------------------|-----------------|--------------------------|
| 33,37% | 17,35% | 5,57% | 25,21% | 3,05% | 1,20% | 0,75% | 5,57% | 75% |

Zaprawy do badań przygotowano zgodnie z proporcjami zawartymi w Tabeli 5. Oprócz próbki kontrolnej wykonano również próbki, w których zastąpiono 10 lub 20% cementu popiołem lotnym wapiennym [oznaczone (-)], oraz próbki gdzie 10 lub 20% kruszywa zostało zastąpione popiołem lotnym wapiennym [oznaczone (+)].

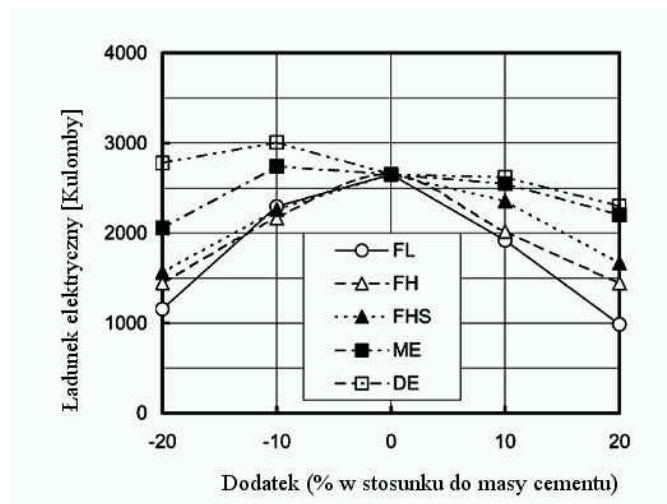
Tabela 5.

Proporcje składników użytych do przygotowania zapraw* [10]

| Oznaczenie | Cement | Woda | Popiół lotny wapniowy | Kruszywo |
|------------|--------|------|-----------------------|----------|
| Kontrolna | 350 | 175 | 0 | 1900 |
| P(+10) | 350 | 175 | 35 | 1865 |
| P(+20) | 350 | 175 | 70 | 1830 |
| P(-10) | 315 | 175 | 35 | 1900 |
| P(-20) | 280 | 175 | 70 | 1900 |

*masa [kg] na m³ objętości betonu

Badanie przepuszczalności jonów chlorkowych przez beton przeprowadzono zgodnie z amerykańskimi zaleceniami normy AASHTO T277 [11]. Wyniki badania zilustrowano na rys. 4.



Papadakis V.G., Tsimas S. [10]

Ryc. 4. Wpływ zawartości dodatków na ładunek elektryczny przepływający w szybkiej teście penetracji chlorków w próbkach zawierających: FH- popiół lotny wapienny, FL- popiół lotny o niskiej zawartości wapnia, FHS- popiół lotny wysokowapniowy z podwyższoną zawartością siarki, ME- tufy wulkaniczne, DE- ziemię okrzemkową. Po prawej stronie przypadek, gdy dodatek mineralny zastępuje kruszywo, po lewej- cement.

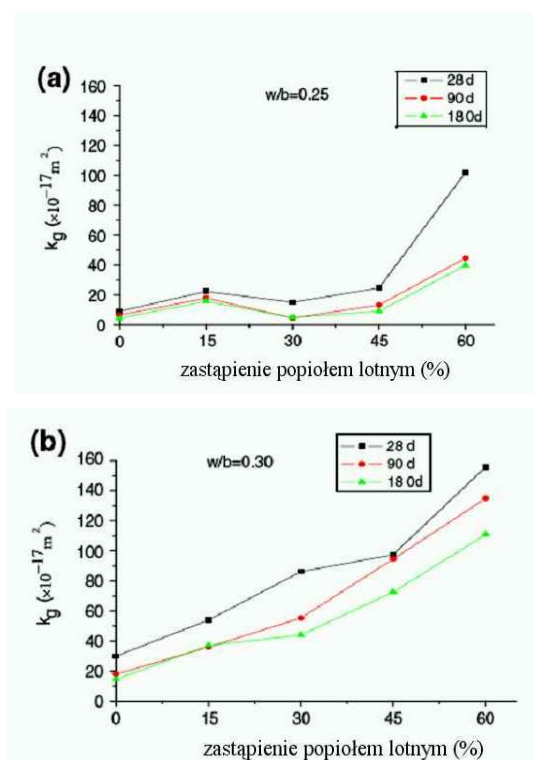
Próbki z betonu zawierającego popioły lotne wapienne charakteryzowały się znacznie niższym przepuszczonym ładunkiem elektrycznym, a tym samym wykazywały niższą przepuszczalność dla jonów chlorkowych w porównaniu z próbką kontrolną. Spośród wszystkich przebadanych popiołów lotnych, popiół o wysokiej zawartości wapnia, ozn. FH, wykazywał pośredni stopień penetracji chlorków, pomiędzy popiołem o niskiej zawartości wapnia, ozn. FL, a popiołem FHS. Zaobserwowano zależność między wzrostem zawartości popiołu lotnego w objętości zaprawy a obniżeniem przepuszczalności jonów chlorkowych.

W porównaniu z próbkami zawierającymi naturalną pucolanę (oznaczonymi jako ME i DE) popiół lotny FH wykazywał niższą przepuszczalność chlorków. W przypadku

naturalnej pucolany również ze wzrostem jej zawartości w objętości zaprawy penetracja jonów chlorkowych spadała, lecz gdy materiał ten zastępował cement w niektórych przypadkach obserwowano większą przepuszczalność jonów chlorkowych niż dla próbki kontrolnej.

4. PRZEPUSZCZALNOŚĆ POWIETRZA PRZEZ BETON I KARBONATYZACJA

Shi i in. [12] przeprowadzili badania gazoprzepuszczalności betonu zawierającego popiół lotny krzemionkowy, stosowany jako zamiennik masy cementu do 60% zastąpienia. Stwierdzono istotny wpływ wskaźnika wodno-cementowego, zmiennego w zakresie od 0,25 do 0,35; na gazoprzepuszczalność betonu. Dodatek popiołów powodował wzrost gazoprzepuszczalności, Rys. 5.



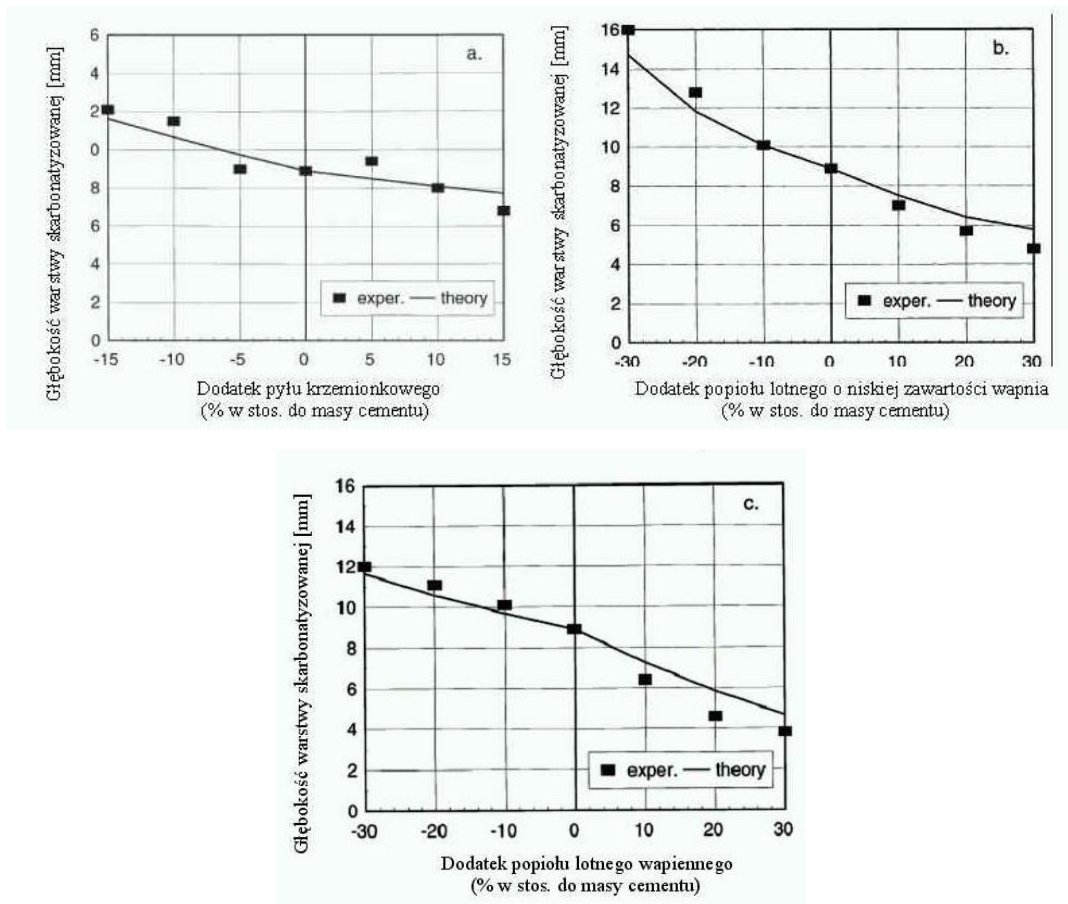
Shi i in., [12]

Ryc. 5. Wpływ zawartości popiołu lotnego na współczynnik gazoprzepuszczalności betonu (określony metodą CEMBUREAU)

Badania Czarneckiego i Woyciechowskiego [13] dotyczyły wpływu fluidalnego popiołu lotnego z spalania węgla brunatnego na karbonatyzację betonu w warunkach przyspieszonych. Badania karbonatyzacji zostały przeprowadzone na betonach o

w/s=0,45 i w/s=0,55 (zastąpienie 15 i 30% cementu przez popiół fluidalny z elektrowni Turów) metodą przyspieszoną w komorze karbonatyzacyjnej zgodnie z PN-EN 13295:2004. Przeprowadzone badania wykazały, że popiół fluidalny o zawartości CaO bliskiej 20% przyspiesza przebieg i zwiększa głębokość karbonatyzacji betonu. Wzrost szybkości i zasięgu karbonatyzacji przy zmianie wskaźnika w/s z 0,45 na 0,55 odpowiadał efektom zwiększenia zawartości popiołu z 15 do 30%. Wpływ badanych popiołów fluidalnych na przebieg karbonatyzacji był podobny jak wpływ krzemionkowych popiołów lotnych, znany z innych publikacji.

Wpływ dodatku popiołu lotnego wapiennego i pyłów krzemionkowych na karbonatyzację badał Papadakis [14].



Papadakis V.G., [14]

Ryc. 6. Wyniki doświadczenia oraz modelowania głębokości karbonatyzacji zapraw zawierających a) pył krzemionkowy, b) popiół lotny o niskiej zawartości wapnia, c) popiół lotny wapienny. Prawa strona- przypadek zastąpienia kruszywa przez dodatek, lewa strona- zastąpienie cementu dodatkiem

Zmierzoną głębokość warstwy skarbonatyzowanej wszystkich próbek przedstawiono na Rysunku 6. Jak widać, we wszystkich przypadkach, głębokość karbonatyzacji

zmniejsza się, gdy ilość zastępowanego przez dodatek kruszywa rośnie, oraz wzrasta, gdy ilość dodatku użytego zamiast cementu rośnie.

Znane stwierdzenie, dotyczące wpływu popiołu lotnego lub pyłu krzemionkowego na zwiększenie szybkości karbonatyzacji, ma uzasadnienie tylko w przypadku zastąpienia przez nie części cementu. Nie tylko wodorotlenek wapnia ulega karbonatyzacji, ale również uwodnione krzemiany wapnia, które stanowią główny produkt reakcji pucolanowej. W przypadku zastąpienia cementu popiołem całkowita ilość skarbonatyzowanych składników spada z powodu zmniejszenia ilości CaO, skutkując wyższym tempem karbonatyzacji. Porównując wyniki zastąpienia 10% cementu lub kruszywa przez dodatki mineralne [14] trzeba zauważyć najmniejszą głębokość warstwy skarbonatyzowanej w przypadku zaprawy zawierającej popiół lotny wapienny, większą w przypadku popiołu lotnego o niskiej zawartości wapnia, a największą głębokość przy zastosowaniu pyłu krzemionkowego.

5. WNIOSKI

Na podstawie przeglądu wyników badań stwierdza się korzystne efekty stosowania popiołu lotnego, ujawniające się znaczącą redukcją współczynnika dyfuzji i współczynnika migracji chlorków. Znacząco większy jest wpływ długotrwałości pielęgnacji wilgotnej w odniesieniu do penetracji chlorków i karbonatyzacji niż w odniesieniu do wytrzymałości. Można spodziewać się podwyższenia współczynnika przepuszczalności powietrza przez beton zawierający popiół lotny wapienny. Negatywny wpływ popiołu na szybkość karbonatyzacji może być mniejszy niż w przypadku popiołu lotnego krzemionkowego. Ponieważ wyniki badań są fragmentaryczne, jest potrzeba przeprowadzenia systematycznych badań trwałości betonu z dodatkiem krajowych popiołów lotnych wapiennych.

Projekt jest współfinansowany przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

BIBLIOGRAFIA

1. Giergiczny Z., Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006, s. 194
2. Baroghel-Bouny V., Durability indicators: relevant tools for performance based evaluation and multilevel prediction of RC durability, Int. RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, Madryt 2006, 24p
3. NT Build 492, Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, 1999
4. Józwiak-Niedźwiedzka D., Effect of fluidized bed combustion fly ash on the chloride resistance and scaling resistance of concrete, Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Performance, Testing and Modeling, 2-5 June 2009, Toulouse, France, RILEM proceedings PRO 63, vol. 2, 556-563
5. Torrent R.J., Performance based specification and conformity control of durability, Int. RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, Madryt 2006, 11p
6. Hansson C.M., Strunge H., Markusse J.B., Frolund T., The effect of the cement type on the diffusion of chloride, Nordic Concrete Research, no. 4, 1985, 70-80
7. Fukute T., Hamada H., Mashimo M., Watanabe Y., Chloride permeability of high strength concrete containing various mineral admixtures, Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 1996, Paris, 489-498
8. Persson B., Assessment of the chloride migration coefficient, internal frost resistance, salt frost scaling and sulphate resistance of self-compacting concrete - with some interrelated properties, Lund Institute of Technology, Lund University, TVBM-3100 Lund 2001, ISBN 91-631-0855-0
9. Elahi A., Basheer P.A.M., Nanukuttan S.V., Khan Q.U.Z., Mechanical and durability properties of high performance concretes next term containing supplementary cementitious materials, Construction and Building Materials 24, Issue 3, 2010, 292-299
10. Papadakis V.G., Tsimas S., Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design, Cement and Concrete Research 32, 2002, 1525-1532
11. AASHTO T 277, Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration
12. Shi H., Xu B., Shi T., Zhou X., Determination of gas permeability of high performance concrete containing fly ash, Materials and Structures 41, 2008, 1051-1056
13. Czarnecki L., Woyciechowski P., Model of concrete carbonation as limitable process - experimental investigations of fluidal ash concrete, Brittle Matrix Composites 9, Warszawa 2009, 183-192

14. Papadakis V.G., Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress, *Cement and Concrete Research* 30, 2000, 291-299

SUMMARY

The objective of the research was the assessment of permeability of concrete containing high-calcium fly ash from lignite combustion in power industry. The influence of high-calcium fly ash addition on concrete resistance to penetration of aggressive media was analysed using published data. Favourable effects of high-calcium fly ash can be expected in respect to chloride diffusion and migration, but also an increase of air permeability and carbonation rate can be found.