

Doc. dr hab. inż. Michał A. Glinicki

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

Mgr inż. Grzegorz Nowowiejski

Hydrobudowa-1 Betoniarnia – Laboratorium Sp. z o.o., Warszawa, doktorant w IPPT PAN

Mgr inż. Mariusz Dąbrowski

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

Mgr inż. Karolina Gibas

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

Wpływ wilgotności betonu i dodatków popiołowych na gazoprzepuszczalność określoną metodą Torrenta

Influence of concrete moisture and ash additions on gas permeability of concrete using Torrent method

Streszczenie:

Przeprowadzono badania doświadczalne przepuszczalności powietrza przez beton przy zastosowaniu nieniszczącej metody Torrenta. Zaprojektowano i wykonano płyty betonowe z mieszanek o jednakowym stosie okruszowym i zróżnicowanym spoiwie poprzez zastosowanie dodatków popiołowych. Wykonane elementy próbne pielęgnowano w warunkach normowych wysokiej wilgotności, a później poddano suszeniu w warunkach laboratoryjnych. Przeprowadzono pomiary współczynnika gazoprzepuszczalności kT oraz oporu elektrycznego sondą Wennera. Ponadto, przeprowadzono normowe określenie wytrzymałości betonu na ściskanie. Jak stwierdzono, współczynnik gazoprzepuszczalności kT betonu zwiększał się o dwa rzędy wielkości wskutek wysychania elementów próbnych. Przydatność sondy Wennera do pośredniego określenia wilgotności betonu była ograniczona. Stwierdzono istotny wpływ modyfikacji popiołowych na współczynnik przepuszczalności powietrza przez beton.

Abstract:

The air permeability of concrete was experimentally determined using nondestructive Torrent method. Test slabs were manufactured using concrete designed with constant aggregate content and variable binder properties due to coal ash application for partial replacement of cement. Test slabs were cured in standard moist environment and subsequently dried in the laboratory. The measurements of air permeability coefficient kT and electrical resistance at concrete surface were performed. It was found that the air permeability coefficient was increased by two orders of magnitude due to slab drying. The applicability of Wenner probe for indirect determination of concrete moisture was quite limited. A significant influence of coal ash additions on the air permeability of concrete was found.

1. Wstęp

Trwałość betonu w konstrukcjach narażonych na oddziaływanie środowiska zależy przede wszystkim od stopnia dostępności jego mikrostruktury dla mediów agresywnych, zarówno cieczy jak i gazów. Najczęściej pojawiającym się medium ciekłym są wodne roztwory różnych substancji, w tym także roztwory substancji chemicznie agresywnych wobec mineralnego szkieletu betonu. Spośród gazów wymienić trzeba przede wszystkim tlen (O_2), azot (N_2) oraz dwutlenek węgla (CO_2) i powietrze. Transport ich zależy przede wszystkim od mikrostruktury betonu oraz pośrednio jego składu i technologii wykonania. Na podstawie przepuszczalności mediów przez beton można klasyfikować odporność betonu na agresywne oddziaływanie środowiska [1]. Określenie przepuszczalności betonu „in situ”, tj. w istniejących obiektach inżynierskich, pozwala oceniać i ewentualnie przewidywać trwałość betonu w konstrukcji. Dlatego ciągle rozwijane są metody diagnostyczne betonu, w szczególności dotyczące jakości betonu w warstwie otuliny zbrojenia [2]. W odróżnieniu od znanej [3] i stosowanej w Polsce [4], [5] laboratoryjnej metody określania gazoprzepuszczalności betonu na próbkach wysuszonych w suszarce (tzw. metoda Cembureau), metoda Torrenta [6] jest przydatna do prowadzenia badań na wykonanych elementach konstrukcji. Aparaturę Torrenta stosuje się do badań prowadzonych w IPPT PAN, obejmujących m.in. zagadnienia szczelności betonów modyfikowanych normowymi i pozanormowymi dodatkami do betonu [7]. Na podstawie rozprawy T. Tracza [5] wiadomo, że współczynnik gazoprzepuszczalności zależy od powierzchni właściwej cementu i związanej z nią wytrzymałości cementu, a także od całkowitej ilości porów otwartych w zawartej w betonie zaprawie, określonej metodą porozymetrii rtęciowej. Dodatkowo wpływ na gazoprzepuszczalność betonu ma rodzaj zastosowanego cementu.

Celem podjętych badań było wdrożenie metody Torrenta do oceny przepuszczalności powietrza przez beton zawierający dodatki popiołowe. Zakres badań objął wybrane popioły lotne krzemionkowe oraz pozanormowe dodatki popiołów ze spalania węgla w kotłach fluidalnych.

2. Badania doświadczalne

2.1 Materiały i próbki

Zaprojektowano mieszanki betonowe z jednakowego kruszywa oraz spoiwa o zmiennym składzie, modyfikowanym poprzez częściowe zastąpienie cementu dodatkami krzemionkowych popiołów lotnych i popiołów pozanormowych. Stosowano następujące składniki:

- cement CEM II B-S 32,5 R – z cementowni Góraźdże,
- grys granitowy Graniczna frakcji 2-8mm oraz 8-16mm,
- domieszka uplastyczniająca FM 787 na bazie eterów polikarboksylowych,
- woda wodociągowa,
- krzemionkowy popiół lotny zgodny z normą PN-EN 450-1, a pochodzący z elektrociepłowni w Zgierzu i w Białymstoku,
- fluidalny popiół lotny ze spalania węgla kamiennego lub węgla brunatnego w kotłach cyrkulacyjnych elektrociepłowni Katowice oraz elektrowni Turów.

Kolejne serie mieszanek betonowych wykonano stosując następujące składniki:

- cement CEM I 42,5 R – z cementowni Małogoszcz,
- grys wapienny Suchowola frakcji 2-8 mm oraz 8-16 mm ,

- domieszki chemiczne: Betostat – silnie działający plastyfikator opóźniająco – napowietrzający oraz Skorbet - superplastyfikator melaminowo-formaldehydowy - PIW Lubanta S.A.

oraz wodę i wymienione powyżej dodatki w postaci fluidalnych popiołów lotnych.

Mieszanki betonowe o zbliżonej konsystencji zaprojektowano metodą doświadczalną, zastępując 20% masy cementu krzemionkowym popiołem lotnym. Fluidalne popioły lotne ze spalania węgla kamiennego i węgla brunatnego dodawano jako zastąpienie 20% lub 30% masy cementu, pomimo niezgodności z wymaganiami normy PN-EN 450-1. Skład mieszanek betonowych podano w Tablicach 1-3.

Wykonano próbki sześciennie o boku 150mm do badań wytrzymałości betonu na ściskanie oraz próbki o wymiarach 500x500x100 mm do badań gazoprzepuszczalności. Próbki były przechowywane w normowo określonych warunkach wysokiej wilgotności i stałej temperatury do chwili badania.

Tablica 1. Skład mieszanek betonowych serii „0”

Składniki mieszanki betonowej kg/m ³	Oznaczenie serii próbek				
	R-161	R-164	R-165	R-162	R-168
Cement CEM II/B-S 32,5 R	547	387	381	386	388
Krzemionkowy popiół lotny zgodny z PN-EN 450-1	-	147	144	-	-
Fluidalny popiół lotny	-	-	-	146 ¹⁾	147 ²⁾
Grys granitowy 2 – 8 mm	609	600	591	613	621
Grys granitowy 8 – 16 mm	928	923	908	932	940
Domieszka FM 787	5,47	11	5,41	5,48	11,03
Woda	227	255	251	227	222

Uwagi: 1) ze spalania węgla brunatnego, 2) ze spalania węgla kamiennego

Tablica 2. Skład mieszanek betonowych serii „1”

Składniki mieszanki betonowej kg/m ³	Oznaczenie serii próbek					
	R-47	R-18	R-20	R-49	R-17	R-19
Cement CEM II/B-S 32,5R	320	226	232	319	217	231
Fluidalny popiół lotny	0	111 ¹⁾	114 ²⁾	0	107 ¹⁾	114 ²⁾
Piasek 0/2 mm	638	635	653	635	612	650
Grys wapienny 2/8 mm	496	496	509	493	478	507
Grys wapienny 8/16 mm	615	616	633	612	594	631
Domieszka Betostat	0,96	1,61	1,66	0,96	1,55	1,65
Domieszka Skorbet	0	11,02	14,12	0	3,24	8,98
Woda	140	144	148	160	157	167

Uwagi: 1) ze spalania węgla brunatnego, 2) ze spalania węgla kamiennego

Tablica 3. Skład mieszanek betonowych serii „2”

Składniki mieszanki betonowej kg/m ³	Oznaczenie serii próbek			
	R-13	R-147	R-14	R-149
CEM I 42,5R Małogoszcz	319	229	324	216
Fluidalny popiół lotny z węgla brunatnego	0	112	0	106
Piasek 0/2 mm	641	642	651	607
Grys wapienny 2/8 mm	489	502	497	474
Grys wapienny 8/16 mm	609	623	618	588
Betostat	1,6	1,63	0,97	1,54
Skorbet	0	9,6	0	1,54
Woda	134	151	154	166

2.2 Metody badań

Badania właściwości mieszanki betonowej przeprowadzono metodami normowymi. Badanie wytrzymałości na ścislenie sześciennych próbek betonowych zgodnie z PN-EN 12390-3 przeprowadzono w terminie 7 dni, 28 dni, 60 dni oraz 90 dni po wykonaniu betonów, stosując maszynę wytrzymałościową klasy I typu Dr MB-300. W każdym terminie badane były trzy próbki- sześciiany o boku 150mm.

Do badań gazoprzepuszczalności betonu zastosowano mobilną aparaturę Torrenta (Rys.1). Głównymi składnikami aparatury są: dwukomorowa głowica pomiarowa, pompa próżniowa o wydajności 1,5 m³/h, presostat, przewody z zaworami, układ mierzący ciśnienie, elektroniczny układ obliczania współczynnika przepuszczalności. Uzupełnieniem aparatury jest urządzenie mierzące opór właściwy betonu. Gradient ciśnienia wywołującego przepływ powietrza przez beton uzyskuje się przez przyłożenie do powierzchni badanego elementu na pewnej ograniczonej powierzchni podciśnienia bliskiego próżni (30 do 50 hPa). Przepuszczalność określoną współczynnikiem przepuszczalności kT urządzenie określa automatycznie na podstawie zarejestrowanej szybkości wyrównywania ciśnienia, określa również głębokość penetracji strumienia powietrza.

RYSUNEK 1

Rys. 1. Widok mobilnego zestawu Torrenta i sposób pomiaru gazoprzepuszczalności na płytach betonowych

Badanie gazoprzepuszczalności przeprowadzono na płytach o wymiarach 500x500x100 mm - na ich gładkich powierzchniach w pięciu miejscach. Przed oznaczeniem współczynnika przepuszczalności powietrza mierzono opór właściwy (wyrażony w kΩ·cm) za pomocą sondy Wennera.

Badania wykonywano w założonych terminach:

- betony serii „0” - po zakończeniu dojrzewania i wyjęciu próbek z komory klimatycznej, następnie po upływie 1, 2 oraz 7 dni od wyjęcia próbek z komory i przechowywaniu ich w temperaturze 18±2°C i wilgotności względnej powietrza około 55%, a następnie po cyklicznym suszeniu w suszarce o wymuszonym obiegu powietrza i temperaturze 40°C,

- betony serii „1” i „2” - po zakończeniu dojrzewania i wyjęciu próbek z komory klimatycznej, a następnie po upływie 1, 3 oraz 6 dni od wyjęcia próbek z komory i przechowywaniu ich w temperaturze 18±2°C i wilgotności względnej powietrza około 55%.

3 Wyniki badania gazoprzepuszczalności i wytrzymałości na ściskanie

Wyniki badania gazoprzepuszczalności podano jako wartość średnią kT z pięciu oznaczeń, wytrzymałość na ściskanie jako wartość średnią z oznaczenia na trzech próbkach. Wyniki badań przedstawiono syntetycznie na Rys. 2-3 oraz w Tablicach 4 i 5. Do oceny wyników badania współczynnika przepuszczalności powietrza kT zastosowano następujące kryteria [2]:

- $kT < 0,01 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ – bardzo dobra jakość betonu,
- $0,01 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2 < kT < 0,1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ – dobra jakość betonu,
- $0,1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2 < kT < 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ – przeciętna jakość betonu,
- $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2 < kT < 10 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ - zła jakość betonu,
- $kT > 10 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ – bardzo zła jakość betonu.

Wyniki pomiarów kT przedstawione na Rys.2 są zróżnicowane w zależności od składu betonu, a różnice pogłębiały się z czasem wysychania płyt. Najniższe wartości kT zmierzono w przypadku betonu bez dodatków, a najwyższe w przypadku betonów zawierających dodatek popiołów fluidalnych zastępujących 20% masy cementu w mieszance betonowej. Po upływie około 40 dni wysychania stwierdzono, że współczynnik kT mieścił się w zakresie:

- od 0,1 do $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ – w przypadku betonu bez dodatków,
- od 1 do $10 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ – w przypadku betonów z dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego,
- od 10 do $100 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ - w przypadku betonów z pozanormowym dodatkiem fluidalnego popiołu lotnego. Wyniki określania oporu właściwego sondą Wennera nie powiodły się, zmierzone wartości oporu były losowo zmienne i nie wykazały logicznej zmienności, związanej z wysychaniem elementów betonowych.

RYSUNEK 2

Rys.2 Współczynnik przepuszczalności powietrza kT określony metodą Torrenta na płytach z betonu o składzie według Tablicy 1

Wyniki badania gazoprzepuszczalności betonu serii „1” i „2” wykazały dobrą jakość betonu z uwagi na przepuszczalność powietrza: wartości średnie kT mieściły się w zasadzie w granicach od $0,01 \cdot 10^{-16}$ do $0,1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$. Pomimo niewielkich różnic współczynnika kT , przepuszczalność betonu z dodatkiem fluidalnego popiołu lotnego była nieco mniejsza niż betonu bez dodatku. Zaobserwowano zależność współczynnika kT od wytrzymałości betonu na ściskanie, którą zilustrowano na Rys.3.

Tablica 4. Wyniki badania wytrzymałość na ściskanie f_c i współczynnika przepuszczalności powietrza kT betonu serii „1” (skład wg Tablicy 2)

Wytrzymałość na ściskanie f_c i współczynnik przepuszczalności powietrza kT	Oznaczenie serii próbek					
	R-47	R-18	R-20	R-49	R-17	R-19
f_c po 7 dniach [MPa]	33,5	26,8	28,3	20,6	20,3	25,5
f_c po 28 dniach [MPa]	45,2	50,7	54,4	32,1	40,9	53,4
f_c po 60 dniach [MPa]	47,7	52,4	61,3	32,2	46,6	56,7
f_c po 90 dniach [MPa]	47,6	55,3	57,9	32,9	48,0	60,5
kT (0 dni)* [$\times 10^{-16} \text{ m}^2$]	0,024	0,016	0,022	0,034	0,039	0,030
kT (1 dzień)* [$\times 10^{-16} \text{ m}^2$]	0,014	0,018	0,013	0,037	0,021	0,026

kT (3 dni)* [x10 ⁻¹⁶ m ²]	0,017	0,009	0,010	0,044	0,017	0,015
kT (5 dni)* [x10 ⁻¹⁶ m ²]	0,018	0,006	0,008	0,059	0,016	0,009
maksymalna głębokość penetracji strumienia powietrza L [mm]	10,8	9,2	10,2	16,7	13,4	11,8

*) liczba dni po wyjęciu próbek z komory klimatycznej

Tablica 5. Wyniki badania wytrzymałość na ściskanie f_c i współczynnika przepuszczalności powietrza kT betonu serii „2” (skład wg Tablicy 3)

Wytrzymałość na ściskanie f_c i współczynnik przepuszczalności powietrza kT	Oznaczenie serii próbek			
	R-13	R-147	R-14	R-149
f_c po 7 dniach [MPa]	32,5	43,2	32,4	31,6
f_c po 28 dniach [MPa]	35,2	52,1	36,3	36,1
f_c po 60 dniach [MPa]	40,8	58,3	38,0	42,0
f_c po 90 dniach [MPa]	41,7	62,6	41,8	45,5
kT (0 dni)* [x10 ⁻¹⁶ m ²]	0,021	0,012	0,069	0,060
kT (1 dzień)* [x10 ⁻¹⁶ m ²]	0,020	0,011	0,024	0,019
kT (3 dni)* [x10 ⁻¹⁶ m ²]	0,020	0,011	0,022	0,017
kT (5 dni)* [x10 ⁻¹⁶ m ²]	0,014	0,005	0,021	0,013
maksymalna głębokość penetracji strumienia powietrza L [mm]	9,9	7,5	18,0	16,0

*) liczba dni po wyjęciu płyt z komory klimatycznej

RYSUNEK 3

Rys. 3. Wpływ wytrzymałości na ściskanie (po 28 dniach dojrzewania) na współczynnik gazoprzepuszczalności betonu kT określony metodą Torrenta

Analizując otrzymane wyniki gazoprzepuszczalności można wyróżnić trzy czynniki mające wpływ na przepuszczalność betonu: warunki wilgotnościowe badanych próbek, dodatek popiołu oraz wytrzymałość betonu na ściskanie. Rys. 2 przedstawia zmiany współczynnika przepuszczalności powietrza w funkcji czasu wysychania w zależności od składu mieszanki betonowej, w której zawarte były dodatki popiołowe. Stwierdzono, że najniższy współczynnik przepuszczalności powietrza kT wykazały betony bez dodatków, natomiast najbardziej przepuszczalne okazały się betony z dodatkiem fluidalnych popiołów lotnych. Pejoratywna ocena wpływu dodatku fluidalnych popiołów lotnych na szczelność betonu odpowiada zaobserwowanym w pracy [8] efektom przyspieszonej karbonatyzacji betonów z takimi dodatkami.

Należy zwrócić uwagę na wyraźne różnice współczynnika przepuszczalności powietrza, zilustrowane na rys.2, które wystąpiły dopiero po umieszczeniu próbek w suszarce o wymuszonym obiegu powietrza. Próbki z dodatkiem fluidalnego popiołu lotnego wysychały szybciej niż pozostałe próbki. Jednocześnie metoda wysuszania próbek w podwyższonej temperaturze mogła spowodować powstanie defektów w postaci rys i spękań wewnętrznych. A zatem ocena wpływu dodatków popiołowych na gazoprzepuszczalność betonu jest silnie obciążona wpływem wilgotności próbek.

Wyniki pomiarów przedstawione w Tablicach 4 i 5 pokazują, że po upływie 5 dni od wyjęcia próbek z komory klimatycznej i umieszczeniu ich w warunkach laboratoryjnych, wilgotność próbek nie uległa dużej zmianie, o czym świadczą małe różnice wartości współczynnika przepuszczalności powietrza w kolejnych dniach w odniesieniu do pomiaru początkowego w dniu wyjęcia próbek z komory. Różnica pomiędzy wilgotnością powietrza w laboratorium a wilgotnością betonu w próbkach nie była na tyle wysoka, aby zapewnić szybką migrację wilgoci z betonu.

Wpływ dodatku popiołu na gazoprzepuszczalność betonu można stwierdzić na podstawie wyników badań betonów serii „1” oraz „2”, przedstawionych w Tablicach 4 oraz 5. Oznaczenie współczynnika gazoprzepuszczalności wykonano w warunkach laboratoryjnych, tj. po wyjęciu próbek z komory i przechowywaniu ich w temperaturze $18 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza około 55%. Nie stosowano zatem suszenia próbek w podwyższonej temperaturze. Analizując wyniki badań współczynnika kT po upływie 5 dni od wyjęcia próbek z komory, można zauważyć korzystny wpływ dodatku w postaci fluidalnego popiołu lotnego na szczelność betonu. Zmniejszenie współczynnika przepuszczalności powietrza kT wystąpiło zarówno w przypadku zastosowania popiołu ze spalania węgla brunatnego – zmniejszenie wartości kT o średnio 60%, zarówno w przypadku CEM II/B-S 32,5 R jak i CEM I 42,5 R oraz w przypadku zastosowania popiołu ze spalania węgla kamiennego – zmniejszenie wartości kT o średnio 70% w przypadku CEM II/B-S 32,5R. Efekt taki tłumaczy się zazwyczaj uszczelnieniem mikrostruktury zaczynu cementowego, chociaż ilościowe charakterystyki mikrostruktury nie są dostępne. Można przypuszczać, że ilościowa analiza porowatości matryc cementowych w takich betonach wykaże znaczące różnice.

Otrzymane wyniki przepuszczalności powietrza wykazują korelację z wytrzymałością betonu na ściskanie. Zostało to przedstawione na Rys. 3 na podstawie danych w Tablicach 4 i 5. Na rysunku pokazano krzywą dopasowaną do zbioru wyników i podano arytmetyczną zależność między tymi parametrami w postaci funkcji: $kT = 0,3518e^{-0,0556R}$. Zatem, im większa wytrzymałość betonu na ściskanie, tym niższy współczynnik przepuszczalności powietrza kT , a co za tym idzie większa szczelność betonu. Takie spostrzeżenia dotyczące przepuszczalności betonu określonej metodą Cembureau podano w rozprawie [5]. Należy zauważyć wyższą wytrzymałość na ściskanie betonu z dodatkami fluidalnych popiołów lotnych, w porównaniu do wytrzymałości betonu bez dodatków. Rozpoznanie i ilościowa charakterystyka mikrostruktury matryc cementowych umożliwi głębsze zrozumienie wpływu dodatków popiołowych na gazoprzepuszczalność betonu.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Stwierdzono znaczny wpływ warunków wilgotnościowych przechowywania próbek na współczynnik gazoprzepuszczalności kT . W przypadku betonu bez dodatku wartość współczynnika kT wzrosła na skutek wysychania ponad trzykrotnie, natomiast w przypadku betonów z dodatkami popiołów fluidalnych wzrosła ponad 15 razy.
2. Współczynnik gazoprzepuszczalności kT betonów z dodatkami popiołowymi był od 7 do 35 razy większy niż w przypadku betonu bez dodatków. Najwyższą gazoprzepuszczalność stwierdzono w przypadku betonu z popiołem fluidalnym ze spalania węgla brunatnego.

3. Stwierdzono zależność współczynnika przepuszczalności powietrza kT od wytrzymałości betonu na ściskanie: im wyższa wytrzymałość, tym mniejsza przepuszczalność betonu. Tym samym potwierdzono spostrzeżenia podane w [5], dotyczące metody Cembureau.

4. Oszacowana na podstawie pomiaru współczynnika kT głębokość penetracji strumienia powietrza w przypowierzchniową warstwę betonu wynosiła od 7,5 mm do 18 mm, a zatem była kilkukrotnie mniejsza niż często stosowana grubość otuliny prętów zbrojeniowych w elementach żelbetowych.

Z powodu złożoności procesów dojrzewania i wysychania próbek, uzależnionych również od rodzaju dodatków mineralnych, potrzeba dalszych badań, aby szczegółowo rozpoznać przydatność metody Torrenta do oceny zagrożenia korozyjnego konstrukcji żelbetowych. Należy zwrócić uwagę na intencjonalne kondycjonowanie próbek, aby badania przepuszczalności powietrza prowadzone były w określonym stanie wilgotnościowym betonu.

Publikacje cytowane

[1] 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

[2] RILEM TC 189-NEC: 'Non-destructive evaluation of the concrete cover'. Comparative test - Part I - Comparative test of 'penetrability' methods, Materials and Structures, 38, 2005, 895-906

[3] RILEM TC 116-PCD: Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability. Recommendations - Tests for gas permeability of concrete, Materials and Structures, 32, 1999, 174-179

[4] Śliwiński J., Tracz T.: Przepuszczalność betonu dla gazów-podstawy teoretyczne, metody oceny, wyniki badań, Konferencja "Dni Betonu" 2002, 14s.

[5] Tracz T.: Wpływ rodzaju cementu na przepuszczalność betonów wysokowartościowych. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Kraków 2005,

[6] Torrent R.J.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site. Materials and Structures, 25, 1992, 358-65

[7] Glinicki M.A., Józwiak-Niedźwiedzka D., Gibas K., Ocena przepuszczalności betonu z popiołem lotnym wapniowym – koncepcja badań, Konferencja „Energia i Środowisko w Technologiach Materiałów Budowlanych, Ceramicznych, Szklarskich i Ogniotrwałych”, Wydawnictwo Instytut Śląski Sp. z o.o., Warszawa-Opole 2010, 229-240

[8] 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

Badania były współfinansowane przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.