

Jacek ZYGMUNT
Politechnika Rzeszowska

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI BETONU Z ZASTOSOWANIEM AKTYWOWANEGO MECHANICZNIE (FIZYKOMECHANICZNIE) KRZEMIONKOWEGO POPIOŁU LOTNEGO

W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałości betonu na ściskanie, z zastosowaniem aktywowanego mechanicznie krzemionkowego popiołu lotnego. Aktywowanie popiołu polegało na rozbiciu części ziaren, głównie ziaren większych oraz ziaren zawierających wewnątrz pustki powietrzne. Efektem było uzyskanie wyższej aktywności popiołu lotnego i modyfikacja mikrostruktury stwardniałego zaczynu. Badania przeprowadzono po 7, 28, 56 oraz 84 dniach dojrzewania. Wykonano mieszanki betonowe o zmiennym udziale popiołu lotnego w spoiwie (popiół wprowadzono po stronie spoiwa), jak również o zmiennej proporcji wody do spoiwa. Mieszanki betonowe wykonano z popiołem lotnym bazowym oraz aktywowanym. Określono wytrzymałość betonu na ściskanie oraz przyrost wytrzymałości betonu na ściskanie (uzyskany na skutek zamiany popiołu bazowego na zmodyfikowany, odniesiony do wytrzymałości betonu z popiołem nieaktywowanym oraz odniesiony do wytrzymałości betonu bez udziału popiołu). Stwierdzono, że w wyniku aktywowania popiołu nastąpił wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie widoczny już po 28 dniach wiązania. Relatywny przyrost wytrzymałości betonu (w stosunku do wytrzymałości betonu z popiołem odniesienia, jak i betonu bez popiołu) ulegał zwiększeniu wraz z wiekiem betonu.

1. Wstęp

Krzemionkowe popioły lotne są produktem spalania pyłu węglowego z węgla kamiennego, powstającym na skalę przemysłową w paleniskach elektrowni i elektrociepłowni. Popioły składają się z kulistych, zeszkliwionych ziaren o zróżnicowanej wielkości, zawierającej się w przedziale od około 1 do 100 μm [1]. Wychwytywane są ze strumienia gazów spalinowych za pomocą elektrofiltrów.

Krzemionkowe popioły lotne znajdują zastosowanie w budownictwie, m.in. w technologii betonu, gdzie wykorzystywane są jako pucolanowy dodatek mineralny do produkcji cementów powszechnego użytku [2], jak również do wytwarzania mieszanek betonowych (np. betony zwykłe, wysokowartościowe, samozagęszczalne). W normie na popiół lotny do betonu [3] zostały określone wymagania dotyczące właściwości i kontroli produkcji krzemionkowego popiołu lot-

nego, stosowanego jako dodatku typu II do betonu [4]. Udział popiołów w cementach może osiągać 35% (cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V [2]), natomiast w betonach zwykłych maksymalnie 33% masy cementu [1, 4].

Popioły lotne stanowią wartościowy zamiennik (klinkieru portlandzkiego w cemencie, cementu w mieszance betonowej), również pod względem ekonomicznym. Produkcja klinkieru portlandzkiego jest kosztowna z uwagi na jej energochłonność, jak również limity emisji spalin, głównie CO₂. Wykorzystanie popiołów lotnych jest jednocześnie sposobem na ich odzysk (popioły stanowią produkt uboczny procesów przemysłowego wytwarzania energii).

Badania naukowe dotyczące popiołów lotnych są ukierunkowane głównie na:

- możliwość wykorzystania popiołów powstałych z zastosowaniem metod spalania innych niż tradycyjne (spalanie fluidalne, spalanie z udziałem różnych metod odsiarczania spalin),
- możliwość wykorzystania popiołów powstałych ze spalania materiałów innych niż węgiel kamienny (spalanie węgla brunatnego, współspalanie z węglem kamiennym materiałów niewymienionych w normie na popiół do betonu [3] lub wymienionych, lecz przy udziale przekraczającym dopuszczalny [3]),
- poprawę właściwości krzemionkowych popiołów lotnych (tzw. aktywowanie) dzięki obróbce mechanicznej (mielenie), fizycznej (separacja wybranych frakcji – np. badania K. Rajczyk [5], Z. Giergicznego i M. Gawlickiego [6], P. Chindaprasirta i pozostałych [7]) lub wprowadzeniu dodatkowych związków (pyły krzemionkowe, domieszki chemiczne – np. badania Z. Giergicznego [8]).

2. Badania własne

2.1. Przedmiot badań

Przedmiotem badań autora było ustalenie wpływu aktywowanego mechanicznie krzemionkowego popiołu lotnego na wybrane właściwości betonu.

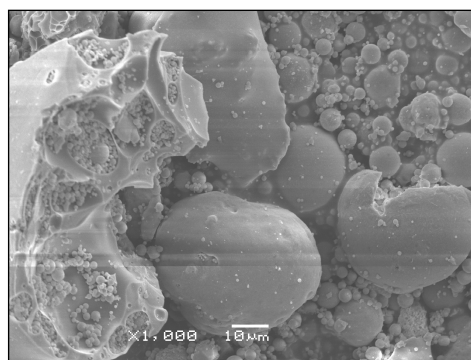
W. Kurdowski w pracy [9] przedstawił proces hydratacji popiołów lotnych. Przebieg twardnienia rozpoczyna się od rozpuszczania się tych materiałów i przechodzenia do roztworu początkowo jonów sodu i potasu, a następnie glinu i krzemionki. Te ostatnie reagują z jonami wapniowymi, tworząc fazę C-S-H, która wydziela się zarówno w porach zaczynu, jak i na powierzchni ziaren popiołu. Czynnikiem determinującym szybkość całego procesu jest przechodzenie krzemionki i glinu do roztworu. Z kolei rozpuszczalność krzemionki i glinu jest funkcją powierzchni właściwej ziaren popiołu.

Istota aktywowania zastosowanego do badań popiołu lotnego polegała na mechanicznym rozdrobnieniu części ziaren popiołu. Rozdrobnieniu uległy głównie ziarna większe oraz ziarna zawierające wewnątrz pustki powietrzne. Na

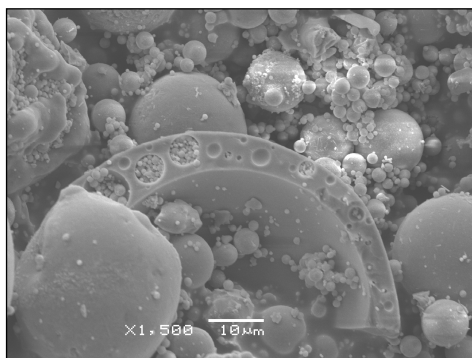
uwagę zasługuje fakt, że instalacja modyfikująca w ten sposób popiół lotny została zbudowana i funkcjonuje na skalę przemysłową (rys. 1.). Zdolność produkcyjna instalacji wynosi 200-300 ton na dobę [10]. Na zdjęciach z mikroskopu skaningowego (rys. 2-4) przedstawiono rozdrobnione ziarna popiołu. Rozdrobnieniu uległy ziarna różnej wielkości. W pustkach częściowo rozdrobnionych większych ziaren popiołu widoczne były liczne drobniejsze ziarna popiołu. W. Kurdowski w pracy [9] podał, że małe ziarna popiołu ulegają przereagowaniu w całości, natomiast w przypadku ziaren większych proces hydratacji sięga do głębokości kilku mikrometrów, co wynika z większej zawartości aktywnej fazy szklistej w mniejszych ziarnach popiołu. Lepsze właściwości pucolanowe ziaren drobniejszych potwierdzili również Z. Giergiczny i M. Gawlicki [6].



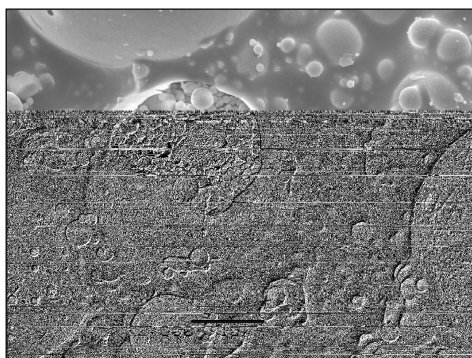
Rys. 1. Węzeł z instalacją do mechanicznego aktywowania popiołu lotnego na terenie elektrociepłowni Jaworzno III



Rys. 2. Aktywowane mechanicznie ziarno popiołu o wielkości ok. 100 μm ; w komorach liczne ziarna o wielkości ok. 1 μm , w tle widoczne dwa kolejne, mniejsze, rozbite ziarna



Rys. 3. Aktywowane mechanicznie sferyczne ziarno popiołu o wielkości ok. 70 μm i grubości ścianki ok. 10 μm ; w komorach widoczne mniejsze ziarna o wielkości ok. 1 μm



Rys. 4. Zniszczone sferyczne ziarno popiołu o wielkości ok. 30 μm i grubości ścianki poniżej 1 μm ; w komorze widoczne mniejsze ziarna o wielkości ok. 1 μm

Zmodyfikowanie mechaniczne popiołu wywołało:

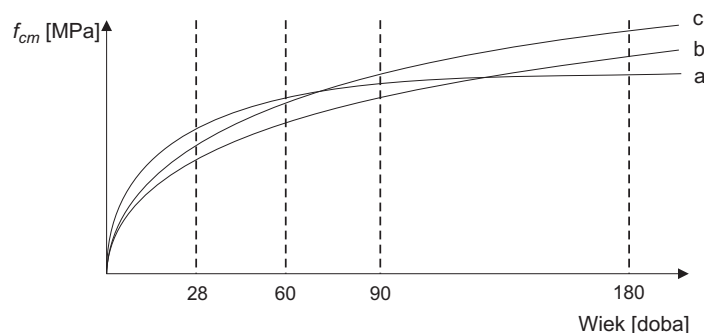
- zwiększenie powierzchni właściwej popiołu przez rozbicie ziaren, jak również rozbicie zwartych skupisk ziaren,
- otworzenie przestrzeni zamkniętych wewnątrz banieczkowatych ziaren popiołu, zawierających kolejne, mniejsze ziarna popiołu,
- mikropęknięcia na powierzchni ziaren popiołu.

Wprowadzone zmiany miały na celu zwiększenie aktywności pucolanowej popiołu oraz poprawienie struktury stwardniałego zaczynu (w zakresie zmniejszenia zawartości ziaren popiołu zawierających pustki).

Przedmiotem szerszych badań autora było ustalenie wpływu aktywowania popiołu na właściwości betonu związane z dodatkami pucolanowymi. W artykule przedstawiono część badań autora dotyczącą wytrzymałości betonu na ściskanie.

Zastąpienie części cementu popiołem lotnym powoduje zmianę rozwoju wytrzymałości spoiwa, charakterystyczną dla dodatków pucolanowych. Z kolei w wyniku zastąpienia popiołu odniesienia popiołem aktywowanym oczekiwano wzrostu wytrzymałości betonu w dłuższym okresie, począwszy od wytrzymałości 28-dniowej. Skróceniu powinien ulegać wiek betonu, po którym osiągnięta zostałaby wytrzymałość betonu bez dodatku popiołu. Takie spoiwo powinno

w średnim terminie (28, 60 dni) osiągnąć wytrzymałość zbliżoną do wytrzymałości betonu na cemencie portlandzkim CEM I, a w dłuższym terminie (60, 90 dni) ją przewyższyć (rys. 5.).



Rys. 5. Wpływ aktywowanego popiołu lotnego na rozwój wytrzymałości betonu na ściskanie (na podstawie właściwości spoiw cementowych oraz cementowo-popiołowych omówionych m.in. w pracach [1, 9] oraz badań J. Olesia [10]). Beton na spoiwie: a – cementowym, b – cementowym z popiołem odniesienia, c – cementowym z popiołem lotnym aktywowanym

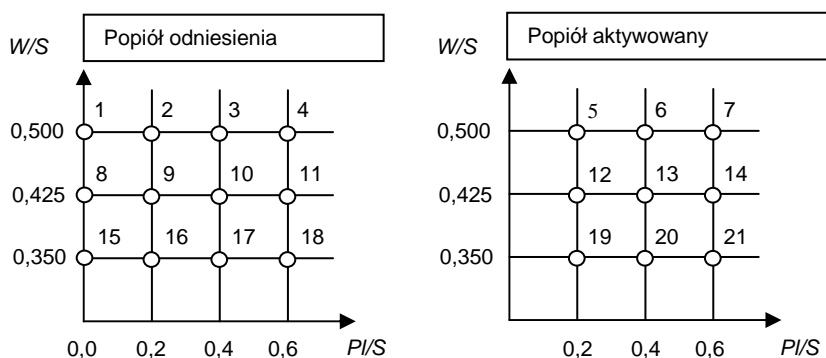
2.2. Zakres badań i użyte materiały

Zaprojektowano mieszanki betonowe o zmiennym udziale popiołu lotnego w spoiwie (popiół wprowadzono po stronie spoiwa). Przyjęto proporcje popiołu lotnego do cementu: $Pl/C = 0,0; 0,2; 0,4; 0,6$, którym odpowiadały udziały popiołu w składzie spoiwa odpowiednio: $Pl/S = 0,0; 16,7; 28,6; 37,5\%$ (spoiwo S uwzględniono jako łączną masę cementu C oraz popiołu lotnego Pl).

Przyjęto również zmienną proporcję wody do spoiwa: $W/S = 0,500; 0,425; 0,350$ (odnosząc się do wartości współczynnika k dla popiołu lotnego w [4], wartość proporcji $W/S = W/(C + kPl)$ obliczono z uwzględnieniem wartości $k = 1,0$ – popiół lotny potraktowano jako równoważny zamiennik cementu). W celu uzyskania mieszanek betonowych o $W/S = 0,425$ oraz $0,350$ część wody zarobowej w mieszankach bazowych ($W/S = 0,500$) zastąpiono superplastyfikatorem.

Mieszanki betonowe wykonano z popiołem odniesienia oraz aktywowanym. Przygotowano łącznie 21 mieszanek betonowych, zgodnie z planem przedstawionym na rys. 6.

Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie przeprowadzono po 7, 28, 56 oraz 84 dniach twardnienia. Wartości wytrzymałości określono na podstawie średnich z 5 pojedynczych wyników. Badania przeprowadzono na próbkach sześciennych o boku 10 cm.



Rys. 6. Plan badań

W wyniku przeprowadzonych badań ustalono:

- wytrzymałość betonu na ściskanie (rys. 9-11),
- wytrzymałość względną betonu z popiołem (bazowym oraz aktywowanym) w odniesieniu do wytrzymałości betonu bez popiołu (tab. 3.),
- efektywność aktywowania popiołu (przyrost wytrzymałości betonu z popiołem aktywowanym do wytrzymałości betonu zawierającego popiół odniesienia) (rys. 12.).

Badania przeprowadzono również na zaprawach normowych, zgodnych z normą na popiół do betonu [3] (zaprawa porównawcza na spoiwie cementowym oraz zaprawa, w których 25% cementu zastąpiono popiołem lotnym).

Oznaczono:

- wytrzymałość zapraw na ściskanie,
- wartość wskaźnika aktywności pucolanowej popiołu odniesienia oraz popiołu aktywowanego (rys. 7.),
- efektywność aktywowania popiołu (przyrost wytrzymałości zaprawy z popiołem aktywowanym do wytrzymałości zaprawy zawierającej popiół odniesienia) (rys. 8.).

Materiały użyte do badań:

- piasek naturalny zwykły 0-2 mm,
- grys bazaltowy 2-16 mm,
- cement CEM I 42,5R o wytrzymałości na ściskanie 58,4 MPa, powierzchni właściwej wg Blaine'a 3475 cm²/g, zawartości C₃A 10,1%, zawartości Na₂O_{eq} 0,79%,
- krzemionkowy popiół lotny o właściwościach przedstawionych w tab. 1.,
- superplastyfikator FM 786, na bazie eterów polikarboksylowych.

Tabela 1. Właściwości popiołu lotnego (wartości średnie na podstawie badań kontrolnych producenta)

Właściwość	Popiół odniesienia		Popiół aktywowany	
Wskaźnik aktywności pucolanowej k_{28} , k_{90}	81,2	96,7	85,7	103,3
Gęstość właściwa [g/cm ³]	2118		2232	
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a [cm ² /g]	-		3160	
Miałkość [%]	31,0		20,1	
Straty prażenia [%]	2,25			
Zawartość SiO ₂ reaktywnego [%]	26,9			
Zawartość SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ [%]	82,2			

2.3. Skład mieszanek betonowych

Skład mieszanki betonowej wzorcowej (nr 1) ustalono metodą trzech równań. Skład pozostałych mieszanek stanowiła modyfikacja składu mieszanki wzorcowej (nr 1), zgodnie z planem badań (rys. 6.). Skład mieszanek przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Skład mieszanek betonowych

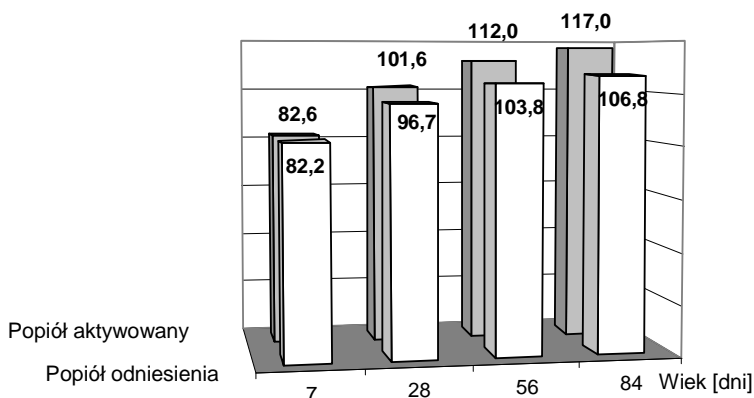
Nr miesz.	W/S	Spoiwo			Kruszywo		Woda W [dm ³]	Super-plastyf. Sup [%]	Obj. miesz. V _{miesz} [dm ³]	Obj. zapr. V _{zapr} [dm ³ /m ³]	Obj. zacz. V _{zacz} [dm ³ /m ³]	Konsyst. miesz.		
		cement C [kg]	popiół lotny PI [kg]	PI/C	spoiwo łącznie S [kg]	drobne P [kg]						grube G [kg]	Vebe [s]	Opad [cm]
1	0,500	360,0	0,0	0,0	360,0	540,0	1450,0	180,0	0,0	1000	509	296	4	4
2, 5		300,0	60,0	0,2					0,0	1007	513	302	3 ; 3	4 ; 4
3, 6		257,1	102,9	0,4					0,0	1013	516	306	- ; -	6 ; 7
4, 7		225,0	135,0	0,6					0,0	1017	518	309	- ; -	8 ; 9
8	0,425	360,0	0,0	0,0				153,0	0,5	974	497	278	7	-
9, 12		300,0	60,0	0,2					0,5	982	501	284	5 ; 5	2 ; 2
10, 13		257,1	102,9	0,4					0,5	988	503	288	4 ; 4	4 ; 4
11, 14		225,0	135,0	0,6					0,5	992	505	290	3 ; 3	5 ; 6
15	0,350	360,0	0,0	0,0				126,0	1,0	948	483	259	10	-
16, 19		300,0	60,0	0,2					1,0	956	487	265	7 ; 4	- ; 5
17, 20		257,1	102,9	0,4					1,0	962	491	269	4 ; -	4 ; 8
18, 21		225,0	135,0	0,6					0,9	966	493	272	3 ; -	5 ; 10

Otrzymane mieszanki betonowe charakteryzowały się dobrą urabialnością, były dobrze zagęszczalne za pomocą stolika wibracyjnego do badania konsystencji metodą Vebe. Uzyskano konsystencje na granicy plastycznej i półcieklej, sporadycznie odpowiadające konsystencji plastycznej bądź półcieklej, w zależności od zrealizowanej receptury.

2.4. Wyniki badań

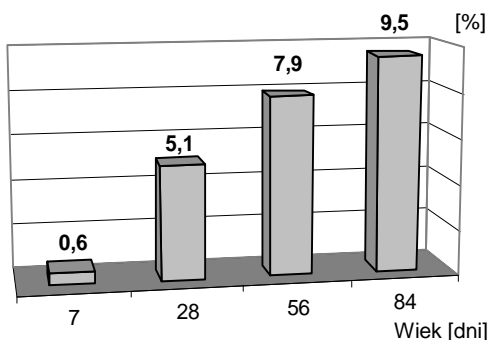
Zaprawy cementowe

Ustalono wartość wskaźnika aktywności pucolanowej popiołu odniesienia oraz popiołu aktywowanego (rys. 7.). Wartość wskaźnika pucolanowego popiołów zwiększała się z czasem twardnienia, przy czym w przypadku zaprawy z popiołem aktywowanym dynamika wzrostu wartości wskaźnika była większa.



Rys. 7. Wartość wskaźnika aktywności pucolanowej popiołów w czasie

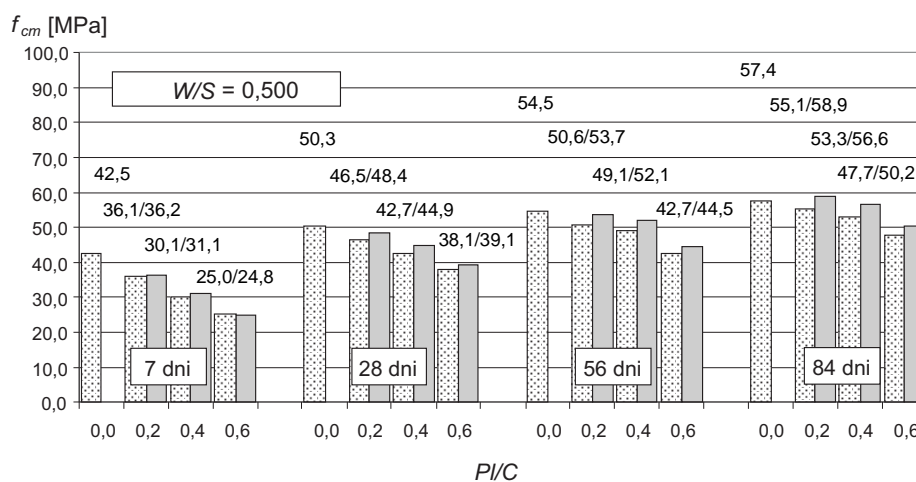
Efektywność aktywowania popiołu (przyrost wytrzymałości zaprawy z popiołem aktywowanym do wytrzymałości zaprawy zawierającej popiół odniesienia) wzrastała z czasem, osiągając wartość 9,5% po upływie 84 dni (rys. 8.). Z kolei efektywność aktywowania popiołu odniesiona do wytrzymałości zaprawy cementowej wyniosła 10,2% po 84 dniach twardnienia (widoczna na rys. 7. jako różnica wartości wskaźnika aktywności pucolanowej popiołów po 84 dniach twardnienia).



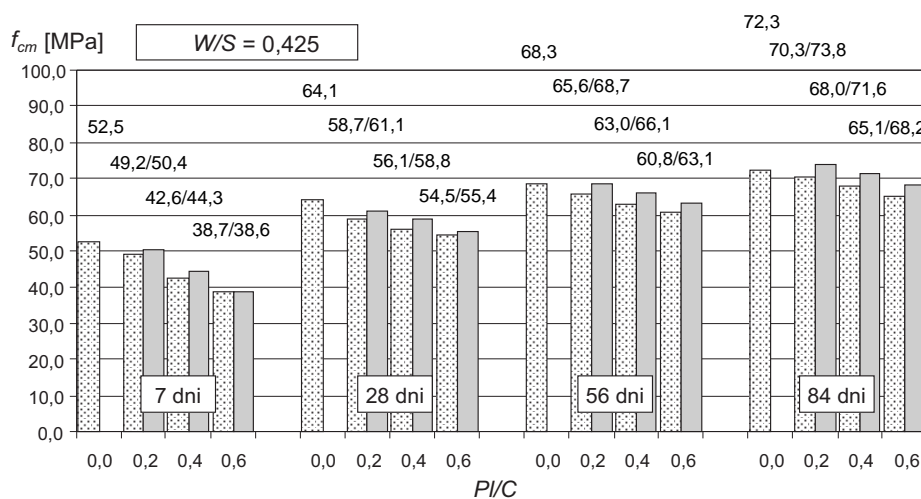
Rys. 8. Efektywność aktywowania popiołu pod względem wytrzymałości na ściskanie zapraw normowych w czasie

Beton

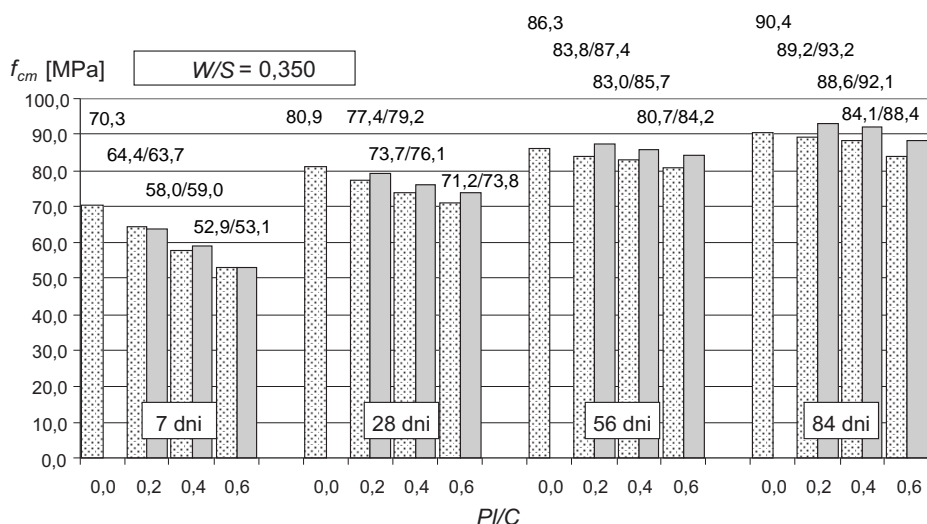
Wytrzymałość betonu na ściskanie przedstawiono na rys. 9-11.



Rys. 9. Wytrzymałość betonu na ściskanie w czasie dla serii o $W/S = 0,500$, przy zmiennym udziale popiołu w spoiwie (ciemniejszy kolor dotyczy betonu z popiołem aktywowanym)



Rys. 10. Wytrzymałość betonu na ściskanie w czasie dla serii o $W/S = 0,425$, przy zmiennym udziale popiołu w spoiwie (ciemniejszy kolor dotyczy betonu z popiołem aktywowanym)



Rys. 11. Wytrzymałość betonu na ściskanie w czasie dla serii o $W/S = 0,350$, przy zmiennym udziale popiołu w spoiwie (ciemniejszy kolor dotyczy betonu z popiołem aktywowanym)

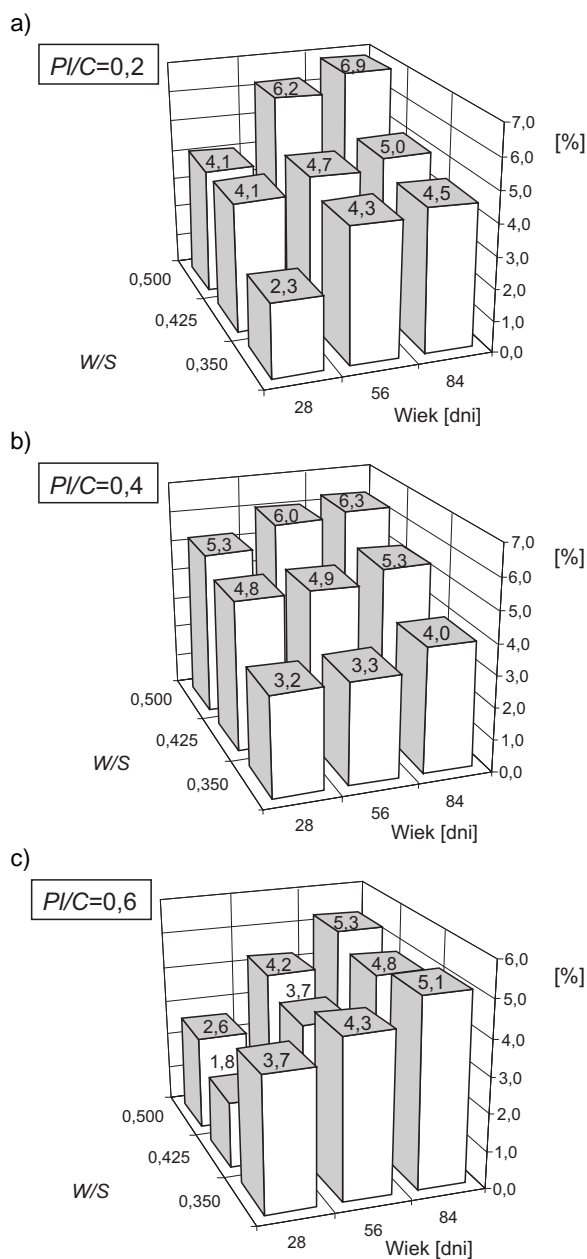
Stosunek [%] wytrzymałości betonu z popiołem do wytrzymałości betonu bez popiołu przedstawiono w tab. 3. Z analizy tych wartości wynika, że zastąpienie popiołu odniesienia popiołem aktywowanym spowodowało wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie średnio o 3,1% (po 28 dniach), 4,2% (po 56 dniach) oraz 4,9% (po 84 dniach), w odniesieniu do wytrzymałości betonu bez popiołu.

Tabela 3. Stosunek [%] wytrzymałości betonu z popiołem do wytrzymałości betonu bez popiołu

PI/C	W/S	Popiół odniesienia				Popiół aktywowany			
		wiek betonu [dni]				wiek betonu [dni]			
		7	28	56	84	7	28	56	84
0,2	0,500	85,0	92,5	92,9	95,9	85,2	96,2	98,7	102,5
	0,425	93,8	91,6	96,0	97,3	96,1	95,4	100,5	102,1
	0,350	91,7	95,7	97,1	98,7	90,7	97,9	101,3	103,2
0,4	0,500	70,9	84,8	90,2	92,8	73,3	89,3	95,7	98,6
	0,425	81,1	87,5	92,2	94,0	84,4	91,7	96,7	99,0
	0,350	82,5	91,1	96,1	98,0	83,9	94,0	99,3	101,9
0,6	0,500	58,9	75,7	78,3	83,1	58,5	77,6	81,7	87,5
	0,425	73,8	85,0	89,1	90,0	73,6	86,5	92,4	94,4
	0,350	75,3	88,0	93,5	93,0	75,5	91,2	97,6	97,8

Efektywność aktywowania popiołu (przyrost wytrzymałości betonu z popiołem aktywowanym do wytrzymałości betonu zawierającego popiół odniesienia)

wzrastała z czasem, chociaż w mniejszym stopniu niż w przypadku zapraw (rys. 12.).



Rys. 12. Efektywność aktywowania popiołu pod względem wytrzymałości betonu na ściskanie, przy udziale popiołu: a) $PI/C = 0,2$, b) $PI/C = 0,4$, c) $PI/C = 0,6$

Z analizy przedstawionych wartości (rys. 12.) wynika, że zastąpienie popiołu odniesienia popiołem aktywowanym spowodowało wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie, średnio o 3,5% (po 28 dniach), 4,6% (po 56 dniach) oraz 5,2% (po 84 dniach), w odniesieniu do wytrzymałości betonu z popiołem nieaktywowanym (efektywność aktywowania popiołu). Na podstawie analizy wyników stwierdzono jednocześnie, że zastąpienie popiołu odniesienia popiołem aktywowanym spowodowało statystycznie istotną różnicę pomiędzy średnimi wartościami wytrzymałości betonu na ściskanie (na podstawie *testu t* do różnicy pomiędzy dwoma średnimi, stosowanego do poszczególnych receptur betonu).

Stwierdzono również, że w przypadku mniejszego udziału popiołu lotnego w spoiwie ($PI/C = 0,2; 0,4$) efektywność aktywowania popiołu wzrastała wraz z proporcją W/S . Można domniemywać, że w przypadku betonu słabszego niż wykonany w badaniach ($W/S < 0,5$) nastąpiłby dalszy wzrost efektywności aktywowania popiołu.

Nie stwierdzono natomiast korelacji efektywności aktywowania popiołu z udziałem popiołu w spoiwie ($PI/C = 0,2; 0,4; 0,6$).

3. Podsumowanie

W pracy dokonano analizy wpływu aktywowanego mechanicznie krzemionkowego popiołu lotnego na wytrzymałość na ściskanie betonu oraz zaprawy normowej. Aktywowanie popiołu polegało na rozbiciu części ziaren, głównie ziaren większych oraz zawierających wewnątrz pustki powietrzne. W wyniku modyfikacji zwiększeniu uległa powierzchnia właściwa popiołu, nastąpiło otwarczenie przestrzeni w ziarnach zawierających liczne, mniejsze ziarna popiołu, na powierzchni ziaren popiołu zostały wywołane mikropęknięcia.

W efekcie zmodyfikowania popiołu nastąpiło zwiększenie jego aktywności pucolanowej. W wyniku zastąpienia popiołu odniesienia popiołem aktywowanym stwierdzono, że:

- nastąpił wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie po 28, 56 oraz 84 dniach twardnienia, niezależnie od udziału popiołu w spoiwie ($PI/C = 0,2; 0,4; 0,6$), jak również serii betonu ($W/S = 0,500; 0,425; 0,350$),
- przyrost wytrzymałości betonu na ściskanie (w odniesieniu do wytrzymałości betonu bez popiołu) wyniósł średnio 3,1% (po 28 dniach twardnienia), 4,2% (po 56 dniach) oraz 4,9% (po 84 dniach),
- efektywność aktywowania popiołu (przyrost wytrzymałości betonu na ściskanie z popiołem aktywowanym do wytrzymałości betonu zawierającego popiół odniesienia) wzrastała z czasem, osiągając wartość średnio 3,5% (po 28 dniach twardnienia), 4,6% (po 56 dniach) oraz 5,2% (po 84 dniach).

Uzyskane wyniki dotyczą badań przeprowadzonych na betonach o stosunkowo dużej wytrzymałości (wytrzymałość betonu na ściskanie bez dodatku po-

popiołu po 28 dniach twardnienia wynosiła 50,3; 64,1 oraz 80,9 MPa, w zależności od serii betonu). Z analizy wyników można przypuszczać, że w przypadku betonu słabszego niż wykonany w badaniach (dla $W/S < 0,5$) nastąpiłby dalszy wzrost efektywności aktywowania popiołu.

W przypadku zapraw normowych efektywność aktywowania popiołu również wzrastała z czasem, osiągając wartość 5,1% (po 28 dniach twardnienia), 7,9% (po 56 dniach) oraz 9,5% (po 84 dniach).

Producenci cementu oraz wytwórcy betonu bardzo chętnie sięgają po krzemionkowy popiół lotny nie tylko z powodu jego właściwości, lecz również z przyczyn ekonomicznych. Popyt na popioły lotne jest duży i pozostanie na takim poziomie w przyszłości. Uzasadnione są poszukiwania rozwiązań materiałowych skutkujących poprawą właściwości popiołu. Omówiony sposób aktywowania popiołu jest przykładem rozwiązania dającego możliwość wykorzystania 100% powstających przy spalaniu popiołów.

Literatura

1. Neville A.M.: *Właściwości betonu*. Kraków 2000
2. PN-EN 197-1:2002. *Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*
3. PN-EN 450-1:2006. *Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*
4. PN-EN 206-1:2003. *Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*
5. Rajczyk K.: *Mikropopioły jako nowy aktywny dodatek mineralny*. Mat. konf. VI Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Popioły z energetyki”, Łicheń Stary, 13-15 października 1999, s. 217-228
6. Giergiczny Z., Gawlicki M.: *Popiół lotny jako aktywny składnik cementów i dodatek mineralny do betonu*. Mat. konf. „Dni betonu. Tradycja i nowoczesność”, Wisła, 11-13 października 2004, s. 276-293
7. Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C., Sinsiri T.: *Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste*. Cem. & Concr. Composites, no 27, 2005, pp. 425-428
8. Giergiczny Z.: *Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych*. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006
9. Kurdowski W.: *Chemia cementu*. PWN, Warszawa 1991
10. Oleś J.: *Aktywowany popiół lotny „Megapar A”. Zastosowanie materiału uzyskiwanego w instalacji przemysłowej i jego wpływ na parametry użytkowe betonów*. Mat. konf. XI Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Popioły z energetyki”, Zakopane, 13-16 października 2004

PROPERTIES OF CONCRETE WITH MECHANICALLY (PHYSIC-MECHANICALLY) ACTIVATED SILICEOUS FLY ASH

S u m m a r y

In this article the results of compression strength of concrete investigations are presented. To make concretes, mechanically activated siliceous fly ash as additive was used. The activation of fly ash was characterized by breaking part of grains, mainly bigger grains and air emptiness containing grains. The result was that the activity of fly ash increased and the microstructure of hardened paste was improved.

The tests were carried out after 7, 28, 56 and 84 days of curing of concrete. The concrete mixes were made with different fly ash/cement ratio (fly ash was used as part of binder) and different water/binder ratio. The concrete mixes were made with base fly ash and activated fly ash. The compression strength of concrete and the increment of compression strength of concrete (as a result of usage activated fly ash instead of base fly ash, compared to the compression strength of concrete with base fly ash and compared to the compression strength of concrete without fly ash) was determined.

As a result of the activation of base fly ash, the increment of compression strength of concrete was found already after 28 days of curing of concrete. The increment of compression strength of concrete (compared to the compression strength of concrete with base fly ash and the compression strength of concrete without fly ash), was increased during curing of concrete.

Złożono w Oficynie Wydawniczej w czerwcu 2008 r.