



JACEK ZYGMUNT<sup>1)</sup>  
GRZEGORZ PROKOPSKI<sup>2)</sup>

## WŁAŚCIWOŚCI BETONÓW CEMENTOWYCH MODYFIKOWANYCH KRZEMIONKOWYM POPIOŁEM LOTNYM AKTYWOWANYM MECHANICZNIE

**STRESZCZENIE.** W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie, nasiąkliwości oraz skurczu betonów wykonanych z zastosowaniem aktywowanego mechanicznie krzemionkowego popiołu lotnego. Aktywowanie popiołu polegało na rozbiciu części ziaren, głównie ziaren większych oraz ziaren zawierających wewnątrz pustki powietrzne. W wyniku rozdrabniania nastąpiło zwiększenie powierzchni właściwej popiołu, otwarcie przestrzeni wewnątrzziarnowych oraz powstanie mikropęknięć na powierzchni ziaren. Efektem było zwiększenie aktywności popiołu i modyfikacja struktury stwardniałego zaczynu. Badania przeprowadzono po 7, 28, 56, 84 i 168 dniach dojrzewania (wytrzymałość betonu na ściskanie) oraz po 28, 56 i 84 dniach dojrzewania (nasiąkliwość betonu). Skurcz betonu badano przez okres 6 miesięcy. Wykonano mieszanki betonowe o zmiennym udziale popiołu lotnego w spoiwie ( $P/I/C = 0,2; 0,4; 0,6$ ), jak również o zmiennej proporcji wody do spoiwa ( $W/S = 0,350; 0,425; 0,500$ ). Stwierdzono, że zastąpienie popiołu nie aktywowanego popiołem aktywowanym spowodowało wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie oraz spadek jego nasiąkliwości już po 28 dniach twardnienia, niezależnie od proporcji  $P/I/C$  oraz  $W/S$ , nie miało natomiast wpływu na skurcz betonu.

<sup>1)</sup> mgr inż. – Katedra Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa,  
Politechnika Rzeszowska

<sup>2)</sup> prof. dr hab. inż. – Katedra Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa,  
Politechnika Rzeszowska

## 1. WPROWADZENIE

Krzemionkowe popioły lotne są produktem spalania pyłu węglowego z węgla kamiennego, powstającym na skalę przemysłową w konwencjonalnych paleniskach elektrowni i elektrociepłowni. Popioły te składają się z kulistych, zeszkliwionych ziaren, o zróżnicowanej wielkości w przedziale od około 1 do 100  $\mu\text{m}$ . Wychwytywane są ze strumienia gazów spalinowych za pomocą elektrofiltrów. Popioły lotne znajdują zastosowanie w budownictwie, gdzie wykorzystywane są m.in. jako pucolanowy dodatek mineralny do produkcji cementów powszechnego użytku [1], oraz do wytwarzania mieszanek betonowych (betonów zwykłych, wysokowartościowych czy samozagęszczalnych). W normie dotyczącej popiołu lotnego do betonu [2], zostały określone wymagania dotyczące właściwości i kontroli produkcji krzemionkowego popiołu lotnego, stosowanego jako dodatek typu II do betonu [3]. Udział popiołów w cementach może osiągać 35 % (cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V [1]), natomiast w betonach zwykłych 33 % masy cementu [3].

Zastosowanie krzemionkowych popiołów lotnych w technologii betonu jest już bardzo rozpowszechnione, a ich wpływ na kształtowanie właściwości betonu dość dobrze rozpoznany. Spoiwo cementowo-popiołowe w porównaniu do spoiwa bez udziału popiołu (cement portlandzki popiołowy CEM II/A,B-V w porównaniu z cementem portlandzkim CEM I lub częściowe zastąpienie cementu portlandzkiego popiołem lotnym w mieszance betonowej) charakteryzuje się [4 - 5]:

- zmniejszonym ciepłem hydratacji (cecha szczególnie pożądana w przypadku wykonywania elementów masywnych),
- wydłużonym czasem wiązania,
- zmianą rozwoju wytrzymałości w czasie, tj. mniejszym przyrostem wytrzymałości początkowej oraz w kolejnych 30 - 60 dniach twardnienia, natomiast większym przyrostem wytrzymałości w okresie późniejszym, prowadzącym najpierw do zrównania wytrzymałości obu spoiw po około 90 dniach twardnienia, a następnie do zwiększania różnicy wytrzymałości w dalszym okresie, na korzyść cementu popiołowego. W betonie natomiast, w przypadku zastąpienia cementu popiołem lotnym w proporcji zgodnej z zaleceniami normy [3] (współczynnik  $k$ ), zrównanie wytrzymałości z betonem odniesienia może nastąpić szybciej,
- zwiększoną szczelnością betonu wynikającą z modyfikacji struktury jego porowatości (zmniejszenie porowatości betonu związane jest z wypełnieniem porów betonu przez produkty reakcji pucolanowej z udziałem popiołu lotnego),
- zwiększoną odpornością na korozję chemiczną (jako efekt zmniejszenia zawartości związków ulegających korozji: wodorotlenku wapniowego – w wyniku reakcji pucolanowej popiołu lotnego, oraz uwodnionego glinianu trójwapniowego  $\text{C}_3\text{A}$  – w wyniku zastąpienia popiołem lotnym części klinkieru portlandzkiego),
- zwiększeniem urabialności mieszanki betonowej z uwagi na kulisty kształt ziaren popiołu, jak również mniejszą gęstość popiołu niż zastępowany przezeń cement, co ma szczególne znaczenie w technologii betonu pompownego (większa ilość zaczynu).

Krzemionkowe popioły lotne znajdują zastosowanie również w technologii betonów wysokowytrzymałych, podlegającej w ostatnich latach dynamicznemu rozwojowi. Popioły lotne kategorii S (zgodnie z normą dotyczącą popiołu lotnego do betonu [2] – popioły o pozostałości na sicie kontrolnym 45  $\mu\text{m}$  poniżej 12 %) umożliwiają znaczną redukcję wody zarobowej [4, 6]. Częściowe zastąpienie cementu portlandzkiego CEM I takim popiołem umożliwia zmniejszenie współczynnika  $W/C$ , przy jednoczesnym zachowaniu konsystencji mieszanki betonowej, na zasadzie podobnej jak przy stosowaniu domieszek uplastyczniających. Popioły lotne wywierają także wpływ na zmianę struktury strefy przejściowej kruszywo/zaczyn cementowy. W pracy [7] wykazano, że zastosowanie cementu portlandzkiego popiołowego (CEM II/B-V) w miejsce cementu portlandzkiego (CEM I) spowodowało zmianę budowy strefy przejściowej – nastąpił zanik porowatości na skutek wypełnienia porów fazą C-S-H. W połączeniu z zastosowaniem niskiego współczynnika  $W/C$  otrzymano beton wysokowytrzymały, o wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach twardnienia takiej samej jak w przypadku betonu z cementem portlandzkim CEM I. Obserwacje mikrostruktury wykazały, że w przypadku spoiwa z cementem CEM I pęknięcia przebiegały głównie na granicy kruszywo/zaczyn cementowy, natomiast w przypadku spoiwa z cementem CEM II/B-V – głównie przez ziarna kruszywa bazaltowego. Wskazuje to na powstanie mocnych wiązań w strefie przejściowej kruszywo grube/matryca cementowa w drugim przypadku.

Popioły lotne stanowią wartościowy zamiennik klinkieru portlandzkiego w cemencie, czy cementu w mieszance betonowej, również w aspekcie ekonomicznym. Produkcja klinkieru portlandzkiego jest kosztowna z uwagi na energochłonność oraz limity emisji spalin (głównie  $\text{CO}_2$ ). Użycie popiołów lotnych do produkcji betonu jest jednocześnie sposobem na ich zagospodarowanie (popioły stanowią produkt uboczny procesów przemysłowego wytwarzania energii). Popioły lotne stanowią ponadto główny, jeżeli nie jedyny dostępny surowiec pucolanowy, którego zasoby odnawiają się w sposób ciągły.

Badania dotyczące popiołów lotnych, ukierunkowane są głównie na:

- możliwość wykorzystania popiołów powstałych przy zastosowaniu innych, niż tradycyjne, metod spalania (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 nie wymienionych w normie dotyczącej popiołu do betonu [2], lub wymienionych, lecz przy udziale przekraczającym dopuszczalny limit),
- poprawę właściwości krzemionkowych popiołów lotnych (tzw. aktywowanie), wskutek obróbki mechanicznej (mielenie), fizycznej (separację wybranych frakcji) lub wprowadzenie dodatkowych związków (domieszek chemicznych, pyłów krzemionkowych), co wykazały badania wielu autorów [4, 8 - 14],
- ustalenie składu fazowego i struktury szkła frakcjonowanych krzemionkowych popiołów lotnych, w aspekcie możliwości optymalizacji technologii przygotowywania i spalania pyłu węglowego [15 - 17].

## 2. METODY AKTYWOWANIA POPIOŁÓW LOTNYCH

Reakcja pucolanowa w spoiwach zawierających popiół lotny przebiega z pewnym opóźnieniem względem wiązania klinkieru portlandzkiego, co wynika z początkowego przebiegu wiązania – niedobór  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Uzyskiwanie betonów na spoiwie zawierającym popiół lotny oraz na spoiwie bez udziału popiołu o porównywalnych właściwościach związanych ze szczelnością struktury (jak wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość) wymaga dłuższego czasu twardnienia, wynoszącego nawet 90 dni. Poszukiwane są więc rozwiązania prowadzące do szybszego osiągnięcia szczelnej struktury przez betony zawierające popiół lotny.

Jednym ze sposobów jest aktywowanie popiołu przez poddanie go określonym oddziaływaniom (fizycznym, mechanicznym, chemicznym), w efekcie których reakcje pucolanowe ulegają przyspieszeniu przy nie zmienionym udziale popiołu w spoiwie. Aktywowanie popiołu polega na zwiększeniu jego powierzchni właściwej, najczęściej przez rozdrobnienie i/lub wywołanie powierzchniowych mikropęknięć ziaren. Wzrost aktywności pucolanowej popiołów lotnych aktywowanych metodami mechanicznymi wskazano w licznych publikacjach, np. [11 - 13]. Popioły lotne mogą być rozdrabniane przez rozgniatanie, rozcieranie, uderzanie lub rozbijanie w strumieniu powietrza. Uwagę zwraca natomiast fakt zróżnicowanego wzrostu aktywności popiołów w zależności od metody przemiału oraz uzyskanego stopnia rozdrobnienia.

W praktyce przemysłowej najczęściej stosowaną metodę aktywowania mechanicznego stanowi przemiał popiołu w młynach do produkcji cementu (młyny rurowe wielokomorowe – tzw. kulowe). Rozdrabnianie materiału w młynie polega na przetaczaniu mielników (kule metalowe, w końcowej fazie przemiału drobne kulki lub mielniki innego kształtu, tzw. cylpepsy) po rozdrabnianym materiale pod wpływem ruchu obrotowego młyna. Odpowiednio rozdrobniony materiał wraz z przemieszczaniem go do kolejnych komór młyna poddawany jest zgniataniu, zgniataniu z ścieraniem oraz ścieraniu. Stosowane są następujące rozwiązania technologiczne przemiału cementu z popiołem [5]:

- wspólne, jednoczesne mielenie wszystkich składników,
- mielenie klinkieru i gipsu w pierwszych komorach młyna i domieszanie popiołu w ostatniej komorze młyna,
- mielenie cementu w urządzeniach dwumaszynowych, gdzie w młynie pierwszym następuje mielenie cementu portlandzkiego, który następnie domielany jest wraz z popiołem w drugim młynie.

Mielenie w porównywalnym czasie klinkieru, popiołu lotnego oraz cementu portlandzkiego popiołowego powoduje zróżnicowanie powierzchni właściwej tych materiałów [5]. Cement popiołowy, a także sam popiół, uzyskują znacznie większą powierzchnię niż mielony klinkier. Niezależnie jednak od rozwiązania procesu mielenia, następuje aktywowanie popiołu lotnego, efektem czego jest przyspieszenie reakcji pucolanowej, a w konsekwencji wzrost wytrzymałości cementu popiołowego już po 28 dniach twardnienia. Aktywowanie popiołu jest wynikiem rozdrobnienia oraz zniszczenia powierzchni jego kulistych ziaren. Pod względem urabialności

mieszanek betonowych, korzystniejsze jest dodawanie do mieszanek popiołu nie mielonego (jako zamiennik części cementu) zamiast stosowania cementu portlandzkiego popiołowego (z uwagi na kulistą postać ziaren popiołu oraz zwiększoną ilość zaczynu) [4]. Uwagę zwracają publikacje, w których wskazuje się, że wzrost aktywności pucolanowej popiołu modyfikowanego mechanicznie jest wynikiem nie tylko zmiany morfologii ziaren (wzrost rozdrobnienia, powstanie mikrospektań powierzchniowych), lecz również zmian strukturalnych. W popiołach lotnych poddanych przemiałowi w młynach o zróżnicowanym działaniu zaobserwowano zmiany struktury przestrzennej wiązań Si-O-Si oraz T-O-Si (T=Si, Al) [11]. W pracy [14] wykazano ponadto zmiany składu fazowego zarówno klinkieru portlandzkiego jak i popiołu lotnego w przypadku aktywacji mechanicznej mieszaniny tych składników. W tym przypadku stwierdzono szczególnie wyraźny wzrost wytrzymałości spoiwa.

Innym przykładem mechanicznego aktywowania popiołu lotnego jest zmodyfikowany sposób mielenia popiołu w młynie kulowym. Zgodnie z opisem tej metody podanym w [18], sposób aktywacji polega na mieszaniu popiołu w młynie kulowym metodą na sucho, z jednoczesną wibracją mechaniczną zmieniającą strukturę powierzchni ziaren. Wskutek tego powierzchnia właściwa popiołu ulega zwiększeniu o około 15 % w stosunku do popiołu wyjściowego. Czas trwania aktywacji wynosi od 5 do 25 minut.

Separacja drobniejszych frakcji popiołu stanowi z kolei przykład fizycznej metody uzyskiwania popiołu o zwiększonej aktywności. Konstrukcja elektrofiltrów wychytujących popiół lotny umożliwia selektywny odbiór popiołów o zróżnicowanym uziarnieniu. Uziarnienie popiołu w poszczególnych sekcjach elektrofiltru jest zróżnicowane – im dalsza sekcja w kierunku przepływu spalin, tym wychwytywany w niej popiół jest drobniejszy. Analiza badań popiołów o zróżnicowanym uziarnieniu [8, 15 - 17] pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków:

- aktywność pucolanowa popiołu ulega zwiększeniu wraz ze wzrostem udziału ziaren najdrobniejszych,
- najkorzystniejszy wpływ na strukturę zaczynu cementowego ma miejsce w przypadku zastąpienia części cementu portlandzkiego popiołem najdrobniejszym (przy badanym 9 % [8] oraz 20 i 40 % udziale popiołu w cemencie [15 - 17]),
- wytrzymałość na ścislenie spoiwa z udziałem najdrobniejszego popiołu jest porównywalna lub nawet przewyższa wytrzymałość spoiwa cementowego już po 28 dniach twardnienia, oraz znacznie ją przewyższa po dłuższym okresie dojrzewania.

Należy jednocześnie podkreślić, że selektywne wykorzystywanie drobniejszych frakcji popiołu nie rozwiązuje kwestii aktywowania całego uzyskiwanego w procesie odpylania popiołu lotnego. Zróżnicowana aktywność popiołów różnych frakcji związana jest przede wszystkim z powierzchnią właściwą popiołu [4, 15 - 17], a także ze stopniem zeszklenia ziaren oraz strukturą samego szkła [15 - 17]. W składzie fazowym popiołów lotnych obok szkła (faza amorficzna) występują głównie dwa składniki krystaliczne – kwarc oraz mullit. Stwierdzono zróżnicowany stopień zeszklenia popiołów o różnych frakcjach ziarnowych – większa zawartość szkła, a jednocześnie

mniejsza zawartość składników krystalicznych była charakterystyczna dla ziaren drobniejszych. Ustalono ponadto, że aktywność pucolanowa ziaren popiołu w obrębie tej samej frakcji również była zróżnicowana – zdeterminowana z kolei strukturą szkła popiołowego. Stwierdzone w pracach [15 - 17] związki pomiędzy aktywnością pucolanową popiołu, jego uziarnieniem, a zawartością i strukturą szkła popiołowego mogą stanowić istotne wskazówki w aspekcie optymalizacji procesów rozdrabniania i spalania pyłu węglowego.

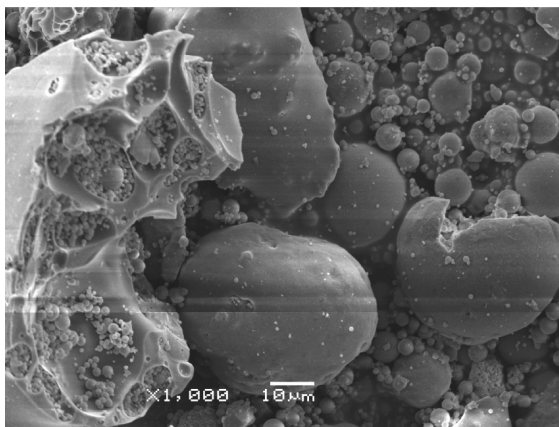
Chemiczne metody aktywowania popiołu lotnego natomiast polegają na użyciu odpowiednich domieszek chemicznych przyspieszających reakcje pucolanowe. W efekcie zajścia tych reakcji na powierzchni ziaren popiołu powstają mikropeknięcia, co przyspiesza oddziaływanie fazy ciekłej na ziarna i dalsze przechodzenie jonów z powierzchni ziaren do roztworu [4]. Przykładem takich domieszek mogą być dodawane w niewielkich ilościach związki sodu ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Rezultatem końcowym ich działania jest zwiększenie stopnia przereagowania popiołu w porównaniu z zaczynami bez domieszki [4].

Aktywowanie popiołu lotnego zastosowanego do badań w niniejszej pracy, polegało na mechanicznym rozdrobieniu części ziaren popiołu, co uzyskuje się wskutek uderzania w ziarna popiołu wibrujących elementów stałych i ruchomych w komorach roboczych urządzenia rozdrabniającego. Rozdrobieniu uległy głównie ziarna większe oraz ziarna zawierające wewnątrz pustki powietrzne. Metoda ta stosowana jest przy produkcji popiołu lotnego pod nazwą Megapar A, a instalacja modyfikująca w ten sposób popiół lotny, została zbudowana i funkcjonuje na skalę przemysłową (rys. 1). Zdolność produkcyjna instalacji jest znacząca i wynosi 200 - 300 ton na dobę [19].



Rys. 1. Węzeł z instalacją do mechanicznego aktywowania popiołu lotnego, znajdujący się na terenie elektrociepłowni Jaworzno III  
Fig. 1. The installation used for the mechanical activation of siliceous fly ash in the heat and power plant Jaworzno III

Na zdjęciach wykonanych w mikroskopie skaningowym (rys. 2 - 4) widać, że rozdrobieniu uległy ziarna o różnych wielkościach. W pustkach częściowo rozdrobnionych, większych ziaren popiołu, widoczne są liczne, drobniejsze ziarna. Małe ziarna 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. Lepsze właściwości pucolanowe ziaren drobniejszych potwierdzono w licznych pracach, m.in. [8 - 10, 15 - 17].



Rys. 2. Zdjęcie aktywowanego mechanicznie ziarna popiołu o wielkości około 100  $\mu\text{m}$ .

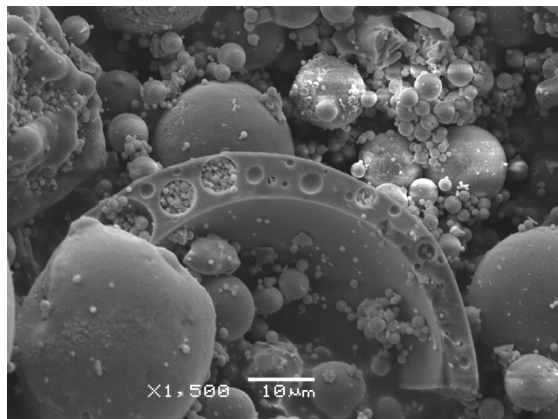
W pustkach wewnątrz rozłamanego ziarna znajdują się liczne, drobne ziarna o wielkości około 1  $\mu\text{m}$ . Na drugim planie widoczne są dwa kolejne, nieco mniejsze rozłamane ziarna

Fig. 2. A mechanically activated grain of fly ash, size about 100  $\mu\text{m}$ . There are numerous, tiny grains (about 1  $\mu\text{m}$  in size) in the air voids inside a broken grain. Two smaller broken grains visible in the background

Na podstawie analizy mikrofotografii popiołów zastosowanych w badaniach (rys. 2 - 4) stwierdzono, że w wyniku modyfikowania mechanicznego popiołu, nastąpiło:

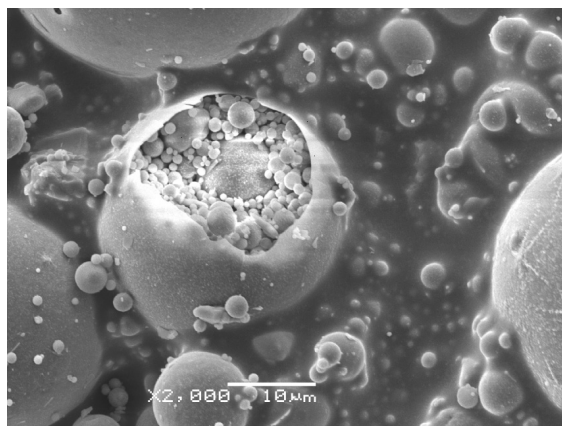
- zwiększenie powierzchni właściwej popiołu przez rozbicie ziaren, jak również rozbicie zwartych skupisk ziaren (powierzchnia właściwa określona metodą Blaine'a uległa wzrostowi z 352 do 370  $\text{m}^2/\text{kg}$ ),
- otwarcie przestrzeni zamkniętych wewnątrz ziaren, zawierających kolejne, mniejsze ziarna,
- powstanie mikropęknięć na powierzchni ziaren popiołu.

Wprowadzenie wskutek modyfikowania mechanicznego zmiany morfologii ziaren zwiększyło aktywność pucolanową popiołu oraz zmniejszyło zawartość ziaren popiołu zawierających pustki, prowadząc w konsekwencji do poprawienia struktury stwardniałego zaczynu. Osiągnięcie tego efektu potwierdziły przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań.



Rys. 3. Zdjęcie aktywowanego mechanicznie sferycznego ziarna popiołu o wielkości około 70  $\mu\text{m}$  i grubości ścianki ziarna około 10  $\mu\text{m}$ . W pustkach rozłamanego ziarna widoczne są liczne, drobne ziarna o wielkości około 1  $\mu\text{m}$

Fig. 3. A mechanically activated spherical grain of fly ash about 70  $\mu\text{m}$  in size. Wall thickness about 10  $\mu\text{m}$ . There are numerous tiny grains (smaller than 1  $\mu\text{m}$ ) in the air voids inside broken grain



Rys. 4. Zdjęcie uszkodzonego sferycznego ziarna popiołu o wielkości około 30  $\mu\text{m}$  i grubości ścianki ziarna poniżej 1  $\mu\text{m}$ . W pustce wewnątrz uszkodzonego ziarna widoczne są liczne, mniejsze ziarna o wielkości około 1  $\mu\text{m}$

Fig. 4. The broken spherical grain of fly ash with size about 30  $\mu\text{m}$  and thickness of wall less than 1  $\mu\text{m}$ . There are numerous, tiny grains with size about 1  $\mu\text{m}$  in the air voids inside broken grain

Z uwagi na duże zapotrzebowanie na popioły lotne oraz ograniczoną możliwość zwiększenia udziału popiołów lotnych w spoiwie, coraz ważniejszego znaczenia nabiera dostępność popiołów wysokiej jakości oraz aktywowanie popiołów. W przypadku cementu popioły poddawane są na ogół obróbce mechanicznej (mielenie w młynach cementowych), natomiast w przypadku dodawania do betonu nie podlegają



modyfikacji. Przedmiotem niniejszej publikacji jest analiza właściwości betonu monolitycznego z dodatkiem popiołu aktywowanego mechanicznie, użytego w miejsce popiołu nie aktywowanego (odniesienia). Popiół lotny został aktywowany metodą przemysłową poza cementownią. Popiół aktywowany mechanicznie już w miejscach jego uzyskiwania mógłby poszerzyć asortyment handlowy i stanowić alternatywę dla popiołu nie aktywowanego, używanego na dużą skalę w betoniarniach. Takie spojrzenie na rozwój zagospodarowania popiołów przedstawiono m.in. w pracy [11].

### 3. ZAKRES BADAŃ ORAZ UŻYTE MATERIAŁY

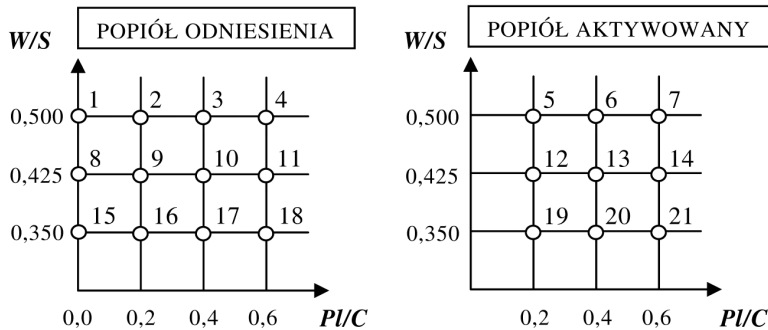
Celem przeprowadzonych badań było ustalenie wpływu aktywowanego mechanicznie krzemionkowego popiołu lotnego na wybrane właściwości betonu - wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość oraz skurcz. Zaprojektowano mieszanki betonowe o zmiennym udziale popiołu lotnego w spoiwie (popiół wprowadzono po stronie spoiwa). Autorzy zdecydowali się na prostą zamianę określonej ilości cementu popiołem, skutkiem czego uzyskano spoiwa o zróżnicowanych właściwościach (rozwiązanie zawarte w normie [3] przewiduje stosowanie odpowiedniej wartości współczynnika  $k$  w celu uzyskania betonu o porównywalnej wytrzymałości). Rozwiązanie przyjęte w badaniach pozwoliło jednak ocenić wpływ aktywacji popiołu lotnego na właściwości zapraw i betonów, co było jednym z zamierzonych celów badań.

Przyjęto proporcje popiołu lotnego do cementu:  $PI/C = 0,0; 0,2; 0,4; 0,6$ , którym odpowiadały udziały popiołu w składzie spoiwa odpowiednio:  $PI/S = 0,0; 16,7; 28,6; 37,5$  % (spoiwo  $S$  uwzględniono jako łączną masę cementu  $C$  oraz popiołu lotnego  $PI$ ). Przyjęto zmienną proporcję wody do spoiwa:  $W/S = 0,350; 0,425; 0,500$  (wartość proporcji  $W/S = W/(C+k \cdot PI)$  obliczono z uwzględnieniem wartości współczynnika  $k = 1,0$  – 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. W celu potwierdzenia przydatności popiołów lotnych również w technologii betonów wysokowytrzymałych [6 - 7], badania przeprowadzono dla betonów zarówno średnio jak i wysokowytrzymałych ( $W/S = 0,350; 0,425; 0,500$ ). Mieszanki betonowe wykonano z popiołem nie poddanym aktywacji (popiół odniesienia) oraz z popiołem aktywowanym. Przygotowano 21 mieszanek betonowych, zgodnie z planem badań przedstawionym na rysunku 5. Badanie wytrzymałości betonów na ściskanie przeprowadzono po 7, 28, 56, 84 i 168 dniach twardnienia, badanie nasiąkliwości betonów po 28, 56 i 84 dniach twardnienia, natomiast skurcz betonów badano przez okres 6 miesięcy.

W wyniku przeprowadzonych badań określono:

- wytrzymałość betonów na ściskanie,
- efektywność aktywowania popiołu (przyrost wytrzymałości betonu na ściskanie z popiołem aktywowanym w porównaniu do wytrzymałości betonu zawierającego popiół odniesienia),
- nasiąkliwość betonów,

- efektywność aktywowania popiołu w aspekcie nasiąkliwości betonu (rozumianej jako spadek nasiąkliwości betonu z popiołem aktywowanym w porównaniu do nasiąkliwości betonu zawierającego popiół odniesienia),
- skurcz betonów.



Rys. 5. Parametry składu betonów

Fig. 5. Concrete composition parameters

Badania przeprowadzono również na zaprawach normowych, zgodnych z normą dotyczącą popiołu lotnego do betonu [2] (zaprawa porównawcza na spoiwie cementowym oraz zaprawa, w których 25 % cementu zastąpiono popiołem lotnym). W odniesieniu do zapraw określono:

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

Próbki zastosowane do poszczególnych badań były następujące:

- wytrzymałość zapraw na ściskanie – beleczki o wymiarach  $40 \times 40 \times 160$  mm. Wartości wytrzymałości określono na podstawie średnich z 6 próbek (połówki beleczek), po dojrzeniu w wodzie o temperaturze  $20^\circ\text{C}$ ,
- nasiąkliwość oraz wytrzymałość betonów na ściskanie – próbki sześciennie o boku 100 mm. Wartości wytrzymałości określono na podstawie średnich z 5 próbek, a nasiąkliwość na podstawie średnich z 3 próbek. Próbki dojrzewały w komorze klimatycznej o wilgotności powietrza 95 % w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ ,
- skurcz betonów – belki o wymiarach  $100 \times 100 \times 540$  mm, po 2 w każdej serii. Próbki przechowywano w warunkach o ustabilizowanej wilgotności powietrza 50 % i temperaturze  $20^\circ\text{C}$ , zgodnie z zaleceniami zawartymi w [20].

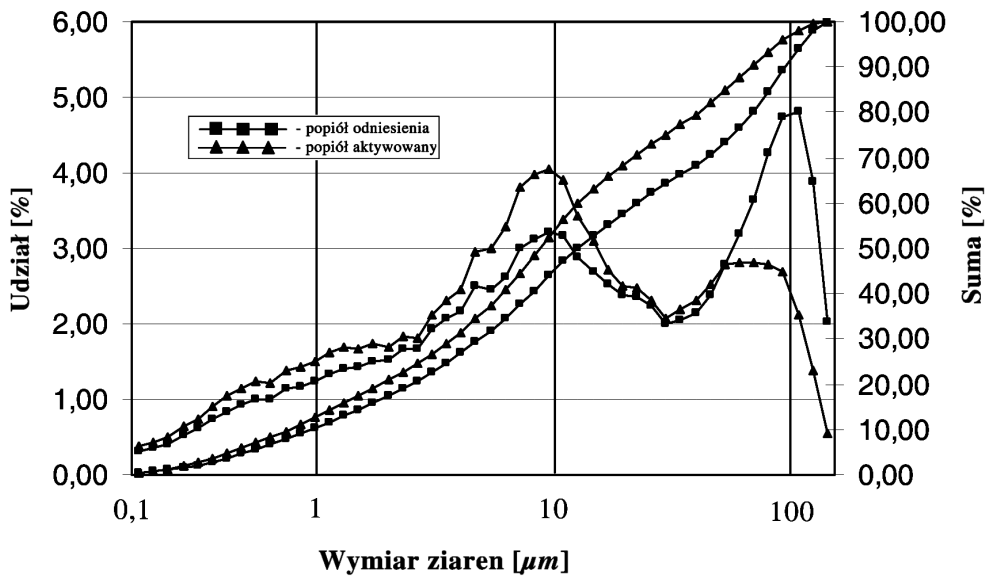
Do badań użyto następujące materiały:

- piasek naturalny zwykły 0 - 2 mm z ZEK Gniewczyna, grys bazaltowy – asortymenty 2 - 8 mm oraz 2 - 16 mm z Przedsiębiorstwa Górniczo - Produkcyjnego BAZALT S.A. w Wilkowie,
- cement CEM I 42,5R z cementowni Małogoszcz, o wytrzymałości na ściskanie 58,4 MPa, powierzchni właściwej wg Blaine'a 347,5 m<sup>2</sup>/kg, zawartości C<sub>3</sub>A 10,1 %, zawartości Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> 0,79 % (na podstawie badań producenta),
- krzemionkowy popiół lotny z elektrociepłowni Jaworzno III, o właściwościach podanych w tablicy 1 oraz na rysunku 6,
- superplastyfikator FM 786 na bazie eterów polikarboksylowych.

Uwagę zwraca znaczące polepszenie parametrów popiołu aktywowanego: zwiększona aktywność pucolanowa, większa gęstość właściwa oraz wyraźnie lepsza mialkość. Należy sądzić, że parametry te miały bezpośredni wpływ na zachowanie się popiołów w dojrzewającym betonie oraz na właściwości stwardniałego betonu.

Tablica 1. Właściwości popiołów lotnych (wartości na podstawie badań kontrolnych producenta)  
Table 1. The properties of fly ashes (values based on producer's quality control results)

Właściwość	Popiół odniesienia		Popiół aktywowany	
Wskaźnik aktywności pucolanowej $k_{28}, k_{90}$	81,2	96,7	85,7	103,3
Gęstość właściwa [kg/m <sup>3</sup> ] (badania własne autorów)	2065		2264	
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a [m <sup>2</sup> /kg] (badania własne autorów)	352		370	
Mialkość (pozostałość na sicie 45 μm) [%]	31,0		20,1	
Straty prażenia [%]	2,25			
Zawartość SiO <sub>2</sub> reaktywnego [%]	26,9			
Zawartość SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	82,2			



Popiół odniesienia	Pow. geometr.	< 10	< 20	< 45	< 60	< 90	D50	D90	D97
	[m <sup>2</sup> /kg]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[μm]	[μm]	[μm]
	218,44	45,88	59,21	72,45	78,68	89,07	12,07	93,72	134,40
Popiół aktywowany	Pow. geometr.	< 10	< 20	< 45	< 60	< 90	D50	D90	D97
	[m <sup>2</sup> /kg]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[μm]	[μm]	[μm]
	261,95	55,02	69,94	83,85	89,23	95,82	8,41	62,56	100,74

Rys. 6. Rozkład uziarnienia popiołu odniesienia oraz popiołu aktywowanego (udziały frakcji oraz udziały frakcji w postaci sumarycznej), uzyskany za pomocą laserowego analizatora uziarnienia LAU-11 (badanie wykonano w ISCMOIB – Oddział w Opolu)

Fig.6. The grain-size distribution of base fly ash and activated fly ash (mass fractions and mass fractions in sums) measured using the laser grain-size distribution analyzer LAU-11 (tests done at ISCMOIB – Opole branch)

#### 4. SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH

Skład mieszanki betonowej wzorcowej (Nr 1) ustalono metodą trzech równań, natomiast pozostałe mieszanki zaprojektowano modyfikując skład mieszanki wzorcowej, zgodnie z przyjętym planem badań (tabl. 2).

Otrzymane mieszanki betonowe charakteryzowały się dobrą urabialnością, były dobrze zagęszczalne za pomocą stolika wibracyjnego do badania konsystencji metodą Vebe. W większości przypadków uzyskano konsystencje na granicy plastycznej i półciekłej, sporadycznie odpowiadające konsystencji plastycznej (mieszanki bez udziału popiołu lotnego) bądź półciekłej (mieszanki z największym udziałem popiołu lotnego).

Tablica 2. Skład mieszanek betonowych  
Table 2. Concrete mix compositions

Nr mieszanek	W/S	Sporiwo				Kruszywo		Woda <i>W</i> [m <sup>3</sup> ]	Superplastyfikator <i>Sup</i> [%]	Objętość mieszanek [m <sup>3</sup> ]	Objętość zaprawy [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Objętość zaczynu [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Konsystencja mieszanek	
		cement <i>C</i> [kg]	popiół lotny <i>Pl</i> [kg]	<i>Pl/C</i>	spoiwo łączące <i>S</i> [kg]	drobne <i>P</i> [kg]	grube <i>G</i> [kg]						Vebe	Opad
1		360,0	0,0	0,0				0,0	1,000	0,509	0,296	4s	40	
2, 5	0,500	300,0	60,0	0,2			0,180	0,0	1,007	0,513	0,302	3 ; 3	40; 40	
3, 6		257,1	102,9	0,4				0,0	1,013	0,516	0,306	- ; -	60; 70	
4, 7		225,0	135,0	0,6				0,0	1,017	0,518	0,309	- ; -	80; 90	
8		360,0	0,0	0,0				0,5	0,974	0,497	0,278	7	-	
9, 12	0,425	300,0	60,0	0,2			0,153	0,5	0,982	0,501	0,284	5 ; 5	20; 20	
10, 13		257,1	102,9	0,4	360,0	540,0		0,5	0,988	0,503	0,288	4 ; 4	40; 40	
11, 14		225,0	135,0	0,6				0,5	0,992	0,505	0,290	3 ; 3	50; 60	
15		360,0	0,0	0,0				1,0	0,948	0,483	0,259	10	-	
16, 19	0,350	300,0	60,0	0,2			0,126	1,0	0,956	0,487	0,265	7 ; 4	- ; 50	
17, 20		257,1	102,9	0,4				1,0	0,962	0,491	0,269	4 ; -	40; 80	
18, 21		225,0	135,0	0,6				0,9	0,966	0,493	0,272	3 ; -	50; 100	

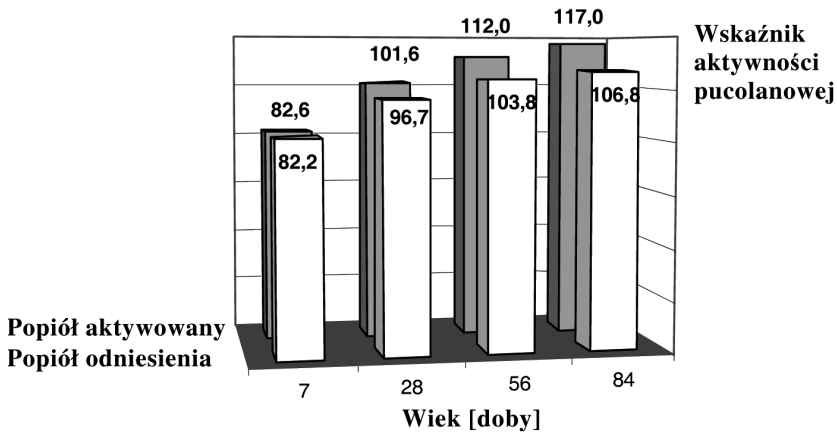
## 5. WYNIKI BADAŃ

### 5.1. ZAPRAWY CEMENTOWE

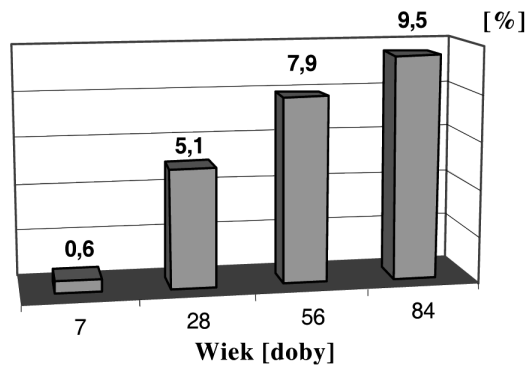
W efekcie przeprowadzonych badań uzyskano następujące wyniki.

Wartość wskaźnika aktywności pucolanowej popiołu odniesienia oraz popiołu aktywowanego pokazano na rysunku 7. Wskaźnik aktywności pucolanowej popiołu jest ilorazem wytrzymałości na ściskanie zaprawy, w której 25 % cementu zastępowane jest badanym popiołem, oraz zaprawy cementowej wykonanej z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, stanowiącej zaprawę porównawczą.

Efektywność aktywowania popiołu (przyrost wytrzymałości na ściskanie zaprawy z popiołem aktywowanym w porównaniu do wytrzymałości zaprawy zawierającej popiół odniesienia) pokazano na rysunku 8.



Rys. 7. Wartość wskaźnika aktywności pucolanowej popiołów w czasie  
Fig. 7. The value of the pozzolanic activity indicator of fly ashes in time



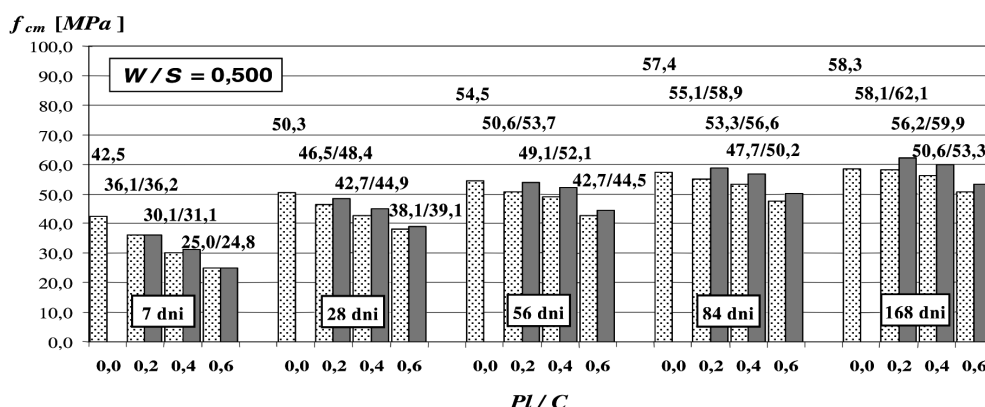
Rys. 8. Efektywność aktywowania popiołu w czasie, mierzona wzrostem wytrzymałości zapraw normowych na ściskanie

Fig. 8. The efficiency of the fly ash activation in time, measured by the increase of compressive strength of standard mortars

Wartość wskaźnika pucolanowego popiołów zwiększała się z czasem twardnienia, przy czym w przypadku zaprawy z popiołem aktywowanym dynamika wzrostu wartości wskaźnika była większa (w okresie pomiędzy 7 a 28 dniem dojrzewania zapraw wskaźnik aktywności pucolanowej popiołu aktywowanego wzrósł o 5,4 % więcej niż wskaźnik aktywności pucolanowej popiołu nie poddanego aktywacji, natomiast w okresach pomiędzy 28 a 56 dniem oraz 56 a 84 dniem dojrzewania zapraw wzrost ten wyniósł odpowiednio 2,9 % oraz 1,6 %). Efektywność aktywowania popiołu zwiększała się z czasem, osiągając wartość 9,5 % po 84 dniach twardnienia zapraw.

## 5.2. BETON

Wyniki badań wytrzymałości betonów na ściskanie przedstawiono na rysunkach 9 - 11.

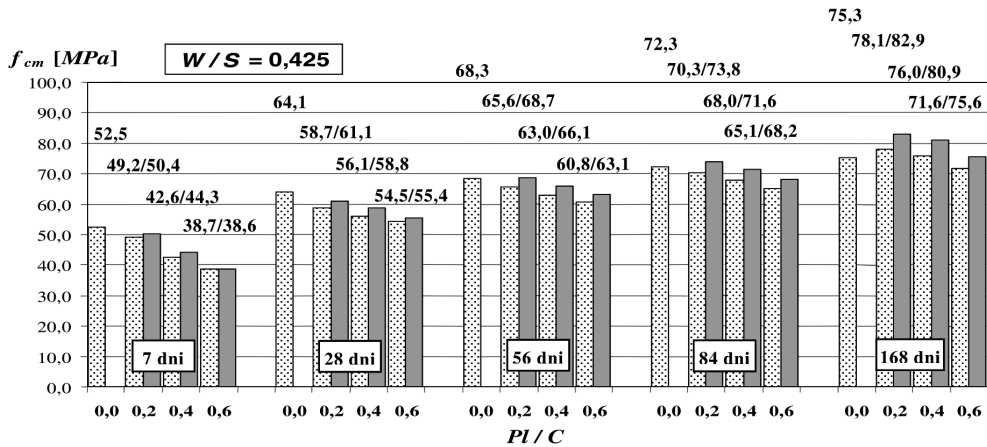


Rys. 9. Wytrzymałość betonów na ściskanie w czasie dla serii o  $W/S = 0,500$ , przy zmiennym udziale popiołu w spoiwie (ciemniejszy kolor słupków dotyczy betonów z popiołem aktywowanym)

Fig. 9. The compressive strength of concrete in time for mixes at water/binder ratio  $W/S = 0.500$  and different fly ash/cement ratio ( $PI/C$ ) (darker color used for the concrete with activated fly ash)

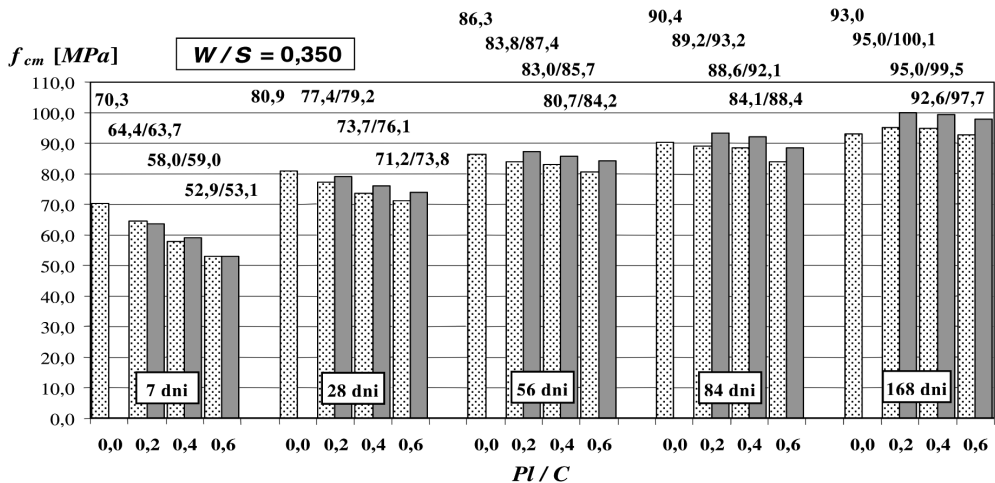
Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że wytrzymałość betonów na ściskanie z popiołem aktywowanym była większa niż w przypadku betonów z popiołem odniesienia, niezależnie od serii betonu, udziału popiołu w spoiwie oraz wieku betonu. Betony z popiołem aktywowanym osiągały wytrzymałość porównywalną do wytrzymałości betonów bez popiołu po około 2 miesiącach twardnienia, natomiast w przypadku betonów z popiołem odniesienia następowało to dużo później – po około 6 miesiącach (z wyjątkiem betonów o największym udziale popiołu w spoiwie, w przypadku których wytrzymałości były znacznie niższe).

Efektywność aktywowania popiołu, tj. przyrost wytrzymałości na ściskanie betonu z popiołem aktywowanym w porównaniu do wytrzymałości betonu zawierającego popiół odniesienia, ulegała wzrostowi z upływem czasu, chociaż w mniejszym stopniu niż w przypadku zapraw (rys. 12).



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

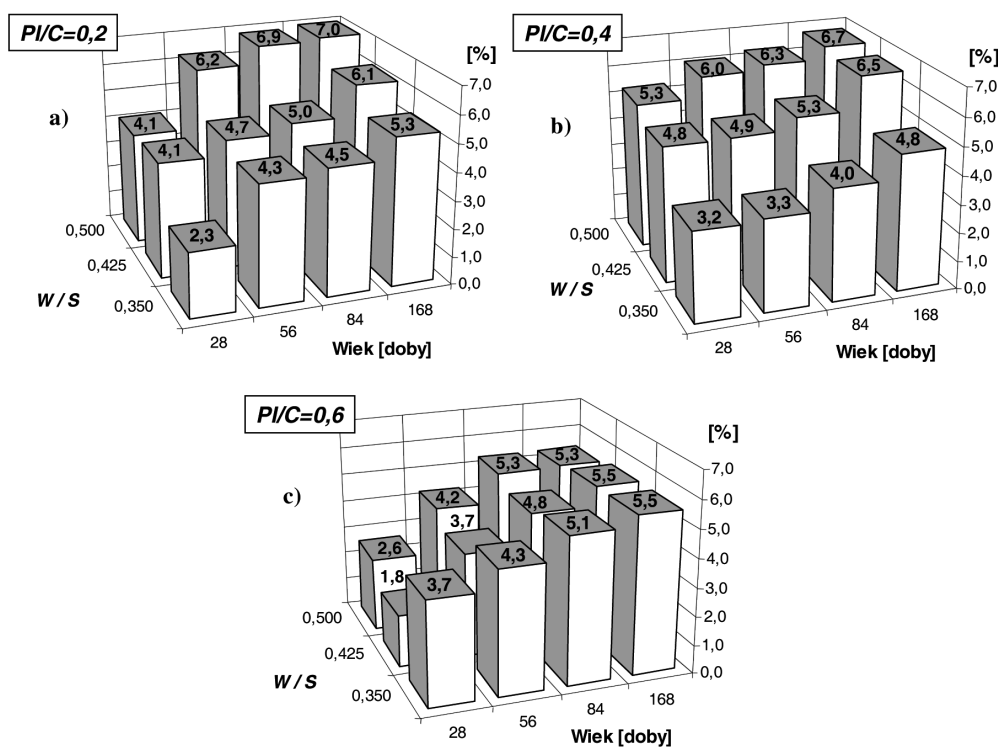
Fig. 10. The compressive strength of concrete in time for mixes at water/binder ratio  $W/S = 0.425$  and different fly ash/cement ratio ( $P/I/C$ ) (darker color used for the concrete with activated fly ash)



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

Fig. 11. The compressive strength of concretes in time for mixes at water/binder ratio  $W/S=0.350$  and different fly ash/cement ratio ( $P/I/C$ ) (darker color used for concrete with activated fly ash)



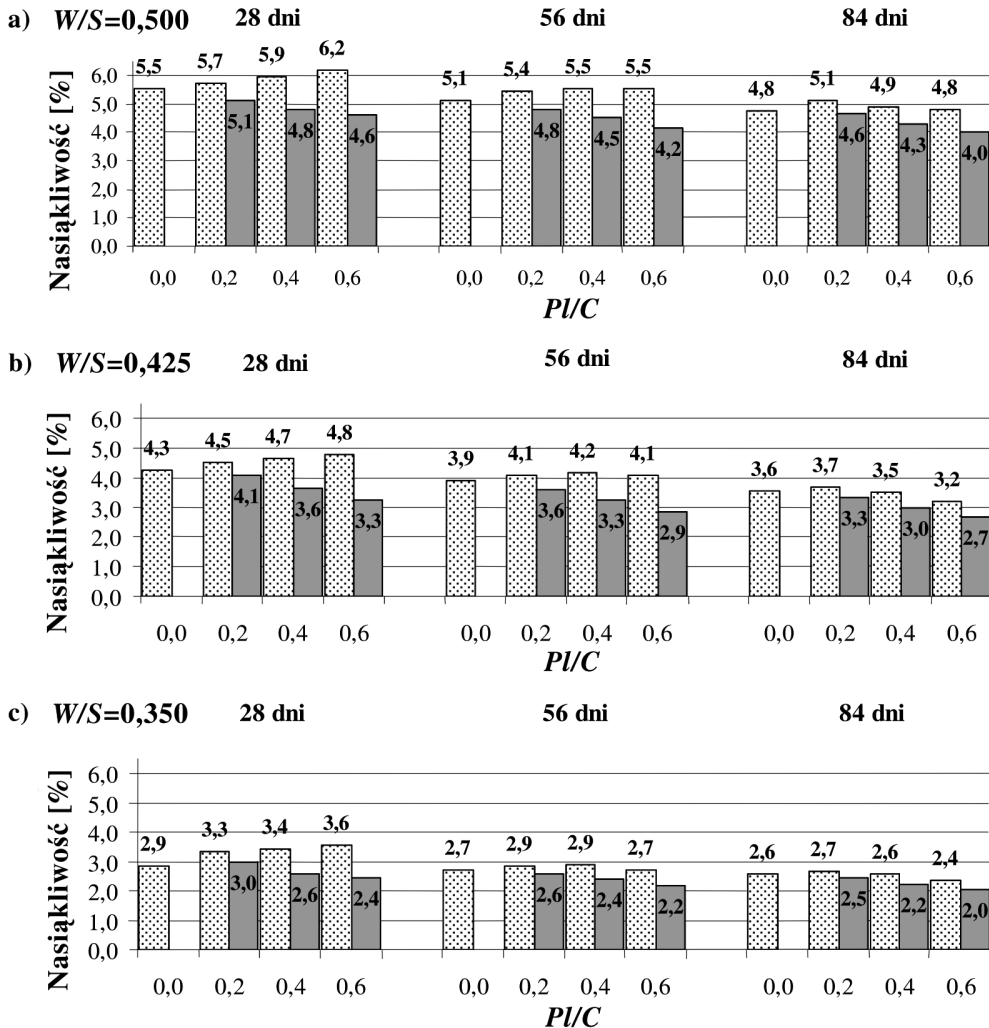


Rys. 12. Efektywność aktywowania popiołu w czasie, mierzona wzrostem wytrzymałości betonów na ściskanie, przy udziale popiołu: a)  $P/I/C=0,2$ , b)  $P/I/C=0,4$ , c)  $P/I/C=0,6$   
 Fig. 12. The efficiency of the fly ash activation in time measured by increase of compressive strength of concrete. The fly ash/cement ratios shown: a)  $P/I/C=0.2$ , b)  $P/I/C=0.4$ , c)  $P/I/C=0.6$

Zastąpienie popiołu odniesienia popiołem aktywowanym powodowało systematyczny wzrost wytrzymałości betonów na ściskanie, średnio o 3,5 % (po 28 dniach), 4,6 % (po 56 dniach), 5,2 % (po 84 dniach) oraz o 5,9 % (po 168 dniach dojrzewania) w porównaniu do wytrzymałości betonów z popiołem nie aktywowanym (efektywność aktywowania popiołu). Na podstawie analizy wyników stwierdzono jednocześnie, że zastąpienie popiołu odniesienia popiołem aktywowanym spowodowało statystycznie istotną różnicę pomiędzy średnimi wartościami wytrzymałości betonów na ściskanie. Uzyskane wyniki dotyczą badań betonów o stosunkowo dużej wytrzymałości (wytrzymałość betonu na ściskanie bez dodatku popiołu po 28 dniach twardnienia wynosiła 50,3; 64,1 oraz 80,9 MPa, przy  $W/S$  wynoszącym odpowiednio 0,500; 0,425 oraz 0,350). W przypadku mniejszego udziału popiołu lotnego w spoiwie ( $P/I/C=0,2$ ; 0,4), efektywność aktywowania popiołu wzrastała wraz ze wzrostem stosunku  $W/S$ . Można przypuszczać, iż w przypadku betonów o gorszych właściwościach mechanicznych niż wykonane w badaniach ( $W/S < 0,5$ ), nastąpiłby większy wzrost efektywności aktywowania popiołu. Nie stwierdzono natomiast korelacji efektywności aktywowania popiołu z udziałem popiołu w spoiwie ( $P/I/C = 0,2$ ; 0,4; 0,6).

Na podstawie przeprowadzonych badań można przypuszczać, że rozdrobnienie popiołu odniesienia spowodowało włączenie do reakcji pucolanowych dodatkowych drobnych ziaren (frakcje o wymiarach poniżej  $1 \mu\text{m}$ ), pochodzących z zamkniętych dotychczas przestrzeni wewnątrzziarnowych. Z danych literaturowych wynika, że te bardzo drobne frakcje cechują się większą aktywnością pucolanową niż ziarna popiołu o większych rozmiarach.

Wyniki badań nasiąkliwości betonów przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Nasiąkliwość betonów w czasie dla serii o  $W/S$ : a) 0,500, b) 0,425, c) 0,350, przy zmiennym udziale popiołu w spoiwie (ciemniejszy kolor dotyczy betonów z popiołem aktywowanym)

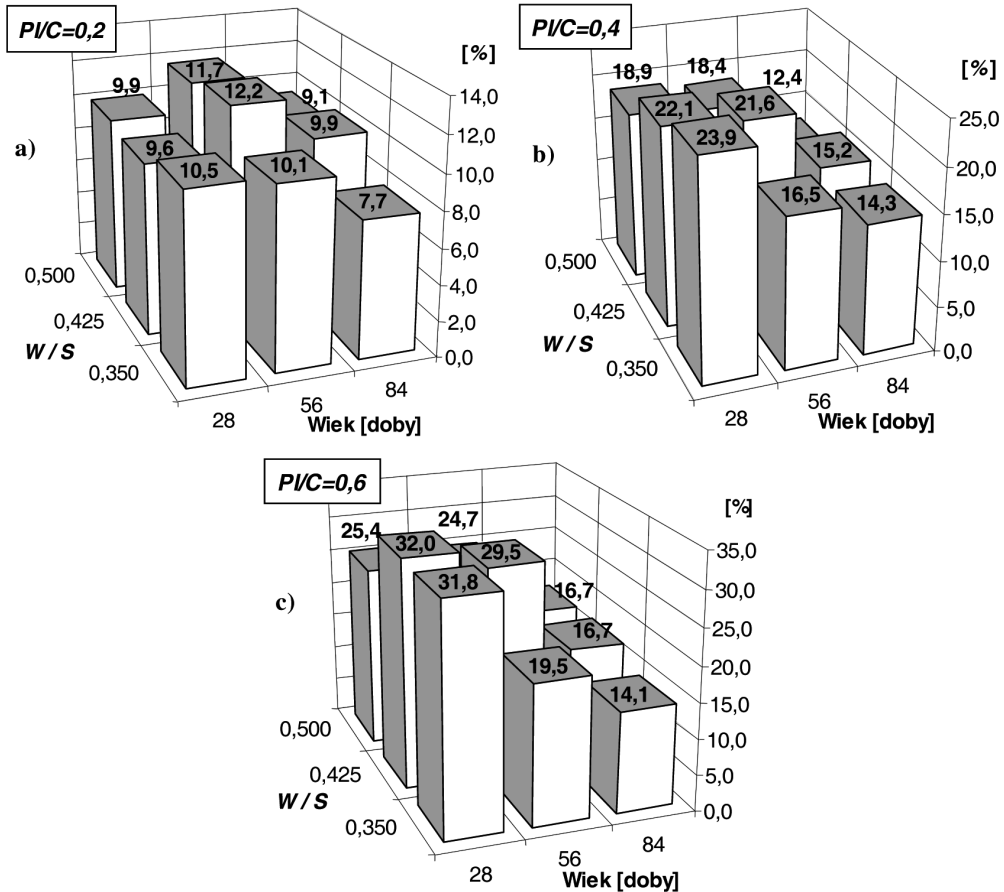
Fig. 13. The water absorption of concrete in time for mixes at water/binder ratios: a) 0.500, b) 0.425, c) 0.350 and different fly ash/cement ratio ( $P/C$ ) (darker color used for concrete with activated fly ash)

W wyniku zastąpienia popiołu odniesienia popiołem aktywowanym zaobserwowano spadek nasiąkliwości betonów, niezależnie od serii betonu, udziału popiołu w spoiwie oraz wieku betonu. Analiza statystyczna uzyskanych wyników wykazała, że zastąpienie popiołu odniesienia popiołem aktywowanym spowodowało statystycznie istotną różnicę pomiędzy nasiąkliwością betonów. Betony z popiołem aktywowanym osiągnęły mniejszą nasiąkliwość niż betony bez popiołu po około 1 miesiącu twardnienia, natomiast w przypadku betonów z popiołem odniesienia nastąpiło to znacznie później – po około 3 miesiącach. Nasiąkliwość betonów z popiołem aktywowanym zmniejszała się wraz ze wzrostem udziału popiołu w spoiwie ( $P/I/C$ ) w całym badanym okresie, natomiast w przypadku betonów z popiołem odniesienia w czasie pierwszych 2 miesięcy dojrzewania betonu występowała tendencja odwrotna.

Efektywność aktywowania popiołu w aspekcie nasiąkliwości betonu (rozumiana jako spadek nasiąkliwości betonu z popiołem aktywowanym w porównaniu do nasiąkliwości betonu zawierającego popiół odniesienia) przedstawiona została na rysunku 14. Zastąpienie popiołu odniesienia popiołem aktywowanym spowodowało zmniejszenie nasiąkliwości betonów, średnio o 20,5 % (po 28 dniach), 18,2 % (po 56 dniach) oraz 12,9 % (po 84 dniach dojrzewania betonu) w porównaniu do nasiąkliwości betonów z popiołem nie aktywowanym. Efektywność aktywowania popiołu ulegała zmniejszeniu z wiekiem betonu. Spowodowane to było dużą dynamiką spadku nasiąkliwości betonu z popiołem aktywowanym w początkowym okresie twardnienia (pierwszy miesiąc), a następnie wyhamowaniem tej dynamiki w okresie późniejszym.

Aktywowanie popiołu (będącego dodatkiem pucolanowym) przyspiesza prawdopodobnie proces zmniejszania porowatości betonu (na skutek szybszego zabudowywania porów betonu przez produkty reakcji pucolanowej), skutkiem czego następuje również spadek jego nasiąkliwości.

Badania skurczu betonów prowadzono przez okres 6 miesięcy. Badania wykazały, że zastąpienie popiołu odniesienia popiołem aktywowanym nie miało wpływu na skurcz betonów. Z przeprowadzonych badań wynika, że około 50 % wartości skurczu 6-miesięcznego przypadało na pierwsze dwa tygodnie dojrzewania, niezależnie od receptury betonu. Natomiast zmiana właściwości betonu związana z aktywowaniem dodatków pucolanowych dotyczyła późniejszego wieku betonu (w przypadku badań wytrzymałości na ściskanie oraz nasiąkliwości betonu zmiany zaobserwowano po około 3 - 4 tygodniach dojrzewania betonu). Zwiększenie aktywności pucolanowej popiołu lotnego powoduje przyspieszenie uszczelniania matrycy cementowej, powstałej w wyniku hydratacji klinkieru portlandzkiego. Efekty uszczelniania betonu widoczne są w stwardniałym betonie dopiero po dłuższym czasie, kiedy pory betonu zostają w znacznym stopniu wypełnione produktami reakcji pucolanowej. Wtedy przyrost skurczu betonu jest już niewielki, pochodzi jedynie od tzw. wysychania betonu, związanego z hydratacją cementu. Przypuszczalnie dlatego aktywowanie popiołu nie miało już większego wpływu na skurcz betonu na tym etapie twardnienia.



Rys. 14. Efektywność aktywowania popiołu w aspekcie nasiąkliwości betonu, przy udziale popiołu: a)  $P/I/C=0,2$ , b)  $P/I/C=0,4$ , c)  $P/I/C=0,6$

Fig. 14. The efficiency of the fly ash activation in time in respect to water absorption of concrete, at the fly ash/cement ratio: a)  $P/I/C=0.2$ , b)  $P/I/C=0.4$ , c)  $P/I/C=0.6$

## 6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastąpienie popiołu odniesienia popiołem aktywowanym spowodowało następujące skutki:

- nastąpił wzrost wytrzymałości betonów na ściskanie przy jednoczesnym spadku ich nasiąkliwości po 28, 56, 84 oraz 168 dniach twardnienia, niezależnie od udziału popiołu w spoiwie ( $P/I/C = 0,2; 0,4; 0,6$ ), jak również serii betonu ( $W/S = 0,350; 0,425; 0,500$ ),
- efektywność aktywowania popiołu (przyrost wytrzymałości betonu na ściskanie z popiołem aktywowanym w porównaniu do wytrzymałości betonu zawierającego popiół odniesienia) wzrastała wraz z upływem czasu, osiągając wartość średnio 3,5 % (po 28 dniach), 4,6 % (po 56 dniach), 5,2 % (po 84 dniach) oraz 5,9 % (po 168 dniach twardnienia betonu),

- nastąpił wyraźny spadek nasiąkliwości betonu z popiołem aktywowanym w porównaniu do nasiąkliwości betonu zawierającego popiół odniesienia. Spadek ten osiągnął wartość średnio 20,5 % (po 28 dniach), 18,2 % (po 56 dniach), oraz 12,9 % (po 84 dniach twardnienia betonu).

Omówiony sposób aktywowania popiołu jest przykładem rozwiązania dającego możliwość wykorzystania całego powstającego przy spalaniu popiołu. Wskazuje jednocześnie na możliwość modyfikowania popiołu w sposób przemysłowy, w miejscu uzyskiwania popiołu. Popiół modyfikowany mechanicznie może stanowić dodatek do mieszanki betonowej, a nie jak dotychczas, składnik cementu (co wynikało ze stosowania wspólnego przemiału popiołu lotnego z klinkierem portlandzkim w cementowni). Wykorzystywanie przez betoniarnie w coraz większym stopniu aktywowanego mechanicznie popiołu lotnego, w miejsce dotychczas stosowanych popiołów lotnych, skutkowałoby poprawą jakości betonu oraz stanowiłoby lepsze zagospodarowanie surowców w aspekcie zrównoważonego rozwoju.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 197-1:2002: Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [2] PN-EN 450-1:2006: Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- [3] PN-EN 206-1:2003: Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [4] *Giergiczny Z.*: Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Seria: Inżynieria Lądowa, Monografia 325, Kraków 2006
- [5] *Peukert S.*: Cementy powszechnego użytku i specjalne. Kraków 2000
- [6] *Giergiczny Z.*: Popiół lotny składnikiem betonu. *Budownictwo Technologie Architektura*, 1/2009, 40 - 43
- [7] *Grzeszczyk S., Starzyk K.*: Znaczenie rodzaju cementu w budowie strefy przejściowej w BWW. *Cement Wapno Beton*, 2/2008, 89 - 98
- [8] *Rajczyk K.*: Mikropopioły jako nowy aktywny dodatek mineralny. *Mat. konf. VI Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Popioły z energetyki”*, Licheń Stary 13 - 15 października 1999, 217 - 228
- [9] *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, 276 - 293
- [10] *Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C., Sinsiri T.*: Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cem. & Concr. Composites*, 27, 2005, 425-428

- 
- [11] Kumar R., Kumar S., Mehrotra S.P.: Towards sustainable solutions for fly ash through mechanical activation. *Resources Conservation & Recycling*, **52**, 2007, 157 - 179
- [12] Saraswathy V., Muralidharan S., Thangavel K., Srinivasan S.: Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete. *Cem. & Concr. Composites*, **25**, 2003, 673 - 680
- [13] Blanco F., Garcia M.P., Ayala J., Mayoral G., Garcia M.A.: The effect of mechanically and chemically activated fly ashes on mortar properties. *Fuel*, **85**, 2006, 2018 - 2026
- [14] Sekulic Z., Popov S., Duricic M., Rosic A.: Mechanical activation of cement with addition of fly ash. *Materials Letters*, **39**, 1999, 115 - 121
- [15] Małolepszy J., Tkaczewska E.: Wpływ struktury fazy szklistej krzemionkowych popiołów lotnych na ich właściwości pucolanowe. *Problemy naukowo-badawcze budownictwa*, t. II, 2007, 119 - 126
- [16] Małolepszy J., Tkaczewska E.: Badania składu fazowego i struktury szkła we frakcjonowanych krzemionkowych popiołach lotnych. *Problemy naukowo-badawcze budownictwa*, t. V, 2008, 411 - 420
- [17] Tkaczewska E.: Właściwości cementów zawierających różne frakcje ziarnowe krzemionkowych popiołów lotnych. *Drogi i Mosty*, 4/2008, 47 - 80
- [18] Sposób aktywacji popiołu konwencjonalnego i fluidalnego ze spalania węgla kamiennego. Opis patentowy nr PL 198988 B1
- [19] 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
- [20] Instrukcja ITB 194/98: Badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach. Warszawa 1998

## PROPERTIES OF CEMENT CONCRETES MODIFIED BY MECHANICALLY ACTIVATED SILICEOUS FLY ASH

### Abstract

The results of compressive strength, water absorption and shrinkage of concrete prepared with addition of mechanically activated siliceous fly ash are presented. The activation of fly ash was characterized by the breaking part of grains, mainly bigger grains and grains containing voids. As a consequence of mechanical activation an increase of specific surface of fly ash was observed, the activity of fly ash increased and the microstructure of hardened paste was improved. The compressive strength tests were carried out after 7, 28, 56, 84 and 168 days of concrete curing and water absorption tests were performed after 28, 56 and 84 days of curing. The shrinkage of concrete was monitored over the period of 6 months. The concrete mixes were prepared with different fly ash/cement ratio ( $P/C = 0.2; 0.4; 0.6$ ) and different water/binder ratio ( $W/S = 0.350; 0.425; 0.500$ ). Fly ash was used as a part of binder. As the result of replacing non-activated (base) fly ash with activated fly ash the compressive strength of concrete increased and water absorption of concrete decreased, both after 28 days of concrete curing. Several fly ash/cement ratios ( $P/C$ ) and water/binder ratios ( $W/S$ ) were investigated. Replacing the base fly ash with activated fly ash had no effect on concrete shrinkage.

