

Badanie właściwości betonów cementowych wykonanych z udziałem odpadów przemysłowych

Dr inż. Wojciech Kubissa, dr inż. Iwona Wilińska, Politechnika Warszawska, mgr inż. Maciej Pałuba, Przedsiębiorstwo Budowy Dróg i Mostów

1. Wprowadzenie

Cementy z dodatkami mineralnymi oraz dodatki stosowane do betonu znajdują coraz szersze zastosowanie w praktyce. Taki stan rzeczy wynika z korzyści ekologicznych i ekonomicznych, jakie niesie ograniczenie ilości zużywanego cementu, szczególnie w sytuacjach, gdy jest on zastępowany odpadem przemysłowym. Można tu wspomnieć m.in. o możliwości oszczędności energii, ograniczenia emisji CO₂, redukcji zużycia surowców naturalnych, zagospodarowywania odpadów przemysłowych, jak też uzyskiwania materiałów finalnych o zmodyfikowanych właściwościach.

Przykładami odpadów szeroko stosowanych do produkcji cementu są popioły lotne ze spalania węgla kamiennego. Obecność popiołu w cemencie modyfikuje jego właściwości, takie jak np.: czas wiązania, tempo narastania wytrzymałości, mikrostruktura stwardniałego zaczynu. Cementy z udziałem dodatków mineralnych znajdują szerokie zastosowanie, np. cement portlandzki popiołowy i cement pucolanowy są przydatne do wykonywania elementów narażonych na agresję siarczanową [1].

W krajach, w których energetyka oparta jest na spalaniu węgla, wykorzystanie powstających w znacznych ilościach popiołów jest bardzo ważne. Krzemianowe popioły lotne pochodzące z konwencjonalnego spalania węgla i spełniające odpowiednie wymagania normowe dotyczące ich właściwości są od lat stosowane w produkcji cementu i betonu, a ich oddziaływanie w środowisku hydratującego cementu zostało już dość dobrze poznane. Mimo to popioły w dalszym ciągu wzbudzają zainteresowanie jako składniki betonów cementowych, a prowadzone w tym zakresie prace dotyczą m.in. badań właściwości fizykochemicznych popiołów i zmienności ich jakości (np. [2, 3]), właściwości materiału cementowo-popiołowego (np. zdolności ochronnych otuliny zbrojenia z zapraw cementowych [4]) czy zastosowań specjalnych takich kompozytów (np. do betonowania podwodnego [5, 6]). Prowadzone są intensywne badania dotyczące popiołów lotnych wapiennych [7–9]. Podkreślić należy, że aktualnie powstające popioły lot-

ne, będące odpadami z przemysłu energetycznego, mogą istotnie różnić się właściwościami fizykochemicznymi, co jest efektem stosowania różnych technologii spalania paliw i oczyszczania gazów spalinowych, jak też różnych paliw stałych, dlatego część prowadzonych prac dotyczy popiołów o niestandardowych właściwościach.

W Polsce produkuje się głównie betony, w których zawartość popiołu nie przekracza 33% w stosunku do masy cementu. Betony o większej zawartości popiołu nie są bardzo rozpowszechnione. W betonach wysokopopiołowych (ang. *High Volume Fly Ash Concrete*) cement jest zastępowany w ilości co najmniej 50% wagowych przez popiół dobrej jakości, stosowany jest niski stosunek woda/cement oraz superplastyfikatory. Betony takie cieszą zainteresowaniem za granicą [10]. Mimo iż termin *High Volume Fly Ash Concrete* został wprowadzony już pod koniec lat 80. ubiegłego wieku, pojawiające się w literaturze światowej nowe doniesienia dotyczące badań właściwości takiego materiału (np. [11–14]) wskazują, że ten temat badawczy jest w dalszym ciągu aktualny.

Aby dany popiół mógł być wykorzystywany jako dodatek do betonu, musi spełniać właściwości określone odpowiednimi normami [15]. Jak już wspomniano, w energetyce powstają także popioły o niestandardowych właściwościach, czego przykładem są popioły pochodzące ze spalania fluidalnego. Odmienne warunki spalania w instalacjach wykorzystujących spalanie fluidalne w porównaniu do technologii konwencjonalnych (niższa temperatura (ok. 850°C), wprowadzenie do złoża sorbentu wapniowego), sprawiają że powstające uboczne produkty spalania znacznie różnią się właściwościami od typowych popiołów [16–18]. Przede wszystkim popioły fluidalne charakteryzują się podwyższoną zawartością związków wapnia (w tym siarczanu (VI) wapnia), odmiennym składem fazy glinokrzemianowej oraz morfologią ziaren. Popioły takie są słabo spieczone, a ziarna ich są porowate, nieregularne, o rozwiniętej powierzchni. Obecny w popiołach fluidalnych CaO charakteryzuje się dużą aktywnością.

W świetle aktualnie obowiązujących norm, popiół fluidalny nie może być stosowany w Polsce jako dodatek do betonu. Ewentualne wprowadzanie popiołu fluidal-

Tabela 1. Składy badanych betonów na 1 m³

Oznaczenia próbek	Składniki	CEM I	CEM II	PK	PF	Piasek	Żwir	Woda
		kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Seria I (0 PK/0 PF)		310,00	–	–	–	567,63	1324,47	186,00
Seria II (25 PK/0 PF)		232,50	–	77,50	0,00	554,91	1294,78	186,00
Seria III (0 PK/25 PF)		232,50	–	0,00	77,50	558,03	1302,06	186,00
Seria IV (12,5 PK/12,5 PF)		232,50	–	38,75	38,75	556,47	1298,42	186,00
Seria V (50 PK/0 PF)		155,00	–	155,00	0,00	542,18	1265,09	186,00
Seria VI (0 PK/50 PF)		155,00	–	0,00	155,00	548,42	1279,65	186,00
Seria VII (25 PK/25 PF)		155,00	–	77,50	77,50	545,30	1272,37	186,00
Seria VIII (0 PK/0 PF)		–	310,00	–	–	554,91	1294,78	186,00

nego do betonu konstrukcyjnego może odbywać się na podstawie uzyskanych aprobat technicznych. W niektórych krajach użycie popiołu fluidalnego jest znormalizowane i w związku z tym dozwolone. Przykładowo, czeska norma [19] pozwala na szerokie użycie popiołu fluidalnego do różnych zastosowań, w tym jako dodatku do betonów.

Rozważając możliwości zastosowania popiołów fluidalnych jako składników betonów, podkreślić należy ich reaktywność w układzie hydratującego cementu. Popioły fluidalne najczęściej charakteryzują się wyższą aktywnością pucolanową w porównaniu do popiołów konwencjonalnych i zdolnością do samozestania w obecności wody [20–22]. Partie o odpowiedniej zawartości gipsu mogą być traktowane jako regulatory czasu wiązania [23]. Jednak pojawiają się też głosy wskazujące na ryzyko związane z wprowadzaniem tego typu materiału do kompozytu cementowego, a związane np. z formowaniem się tzw. opóźnionego *ettringitu* [24] zagrażającego trwałości konstrukcji.

W związku z powyższym, prowadzone są działania mające na celu modyfikacje właściwości popiołu fluidalnego z ograniczeniem lub wyeliminowaniem jego niekorzystnych właściwości, zaś uwypukleniem cech pożądanych. Przykładem użycia aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego jako dodatku do betonu jest materiał o nazwie handlowej Flubet, który jest stosowany na podstawie Aprobatach Technicznych IBDiM i ITB [25, 26]. Jako metoda uszlachetnienia popiołu fluidalnego proponowana jest też separacja popiołów na określone frakcje ziarnowe charakteryzujące się odmiennymi właściwościami [17]. Ciekawą możliwością uzdatniania popiołów fluidalnych jest ich mieszanie z popiołami konwencjonalnymi [27].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości betonów wykonanych z zastosowaniem dodatków w postaci odpadów przemysłowych – popiołów fluidalnych i konwencjonalnych oraz ich mieszanin. Celem pracy było porównanie właściwości betonów wykonanych z dużym udziałem popiołów lotnych i betonów z typową zawartością dodatku mineralnego oraz betonu wykonanego z powszechnie dostępnego w handlu cementu popiołowego.

2. Przeprowadzone badania

Przeprowadzone badania objęły betony, w których część cementu zastąpiono popiołem konwencjonalnym, fluidalnym lub mieszanką składającą się z 50% wag. popiołu konwencjonalnego i 50% wag. popiołu fluidalnego. Dwie serie (I i VIII) wykonano z cementem CEM I i CEM II bez dodatku popiołu. Trzy kolejne (II, III i IV) zawierały dodatek popiołu, który zastąpił 25% masy cementu. W następnych seriach (V, VI i VII) popiołem zastąpiono 50% masy cementu. Składy betonów przedstawiono w tabeli 1. W stosowanych oznaczeniach, oprócz numeru danej serii, umieszczono też, celem bardziej czytelnej identyfikacji próbek, stosunek ilościowy danego popiołu w spoiwie (PK – popiół konwencjonalny, PF – popiół fluidalny, spoiwo = cement + popiół).

Założono dla wszystkich próbek stały współczynnik woda/spoiwo równy 0,60, co miało umożliwić wymieszanie betonów z dodatkiem popiołu fluidalnego, który zwiększa znacznie wodoodporność spoiwa. Zgodnie z przewidywaniami, przy przyjętej ilości wody wszystkie mieszanki betonowe dały się wymieszać i zagęścić bez użycia plastyfikatora i modyfikacji składu. W tabeli 2 zestawiono współczynniki woda/cement i woda/spoiwo z uwzględnieniem współczynnika przeliczeniowego wg [28]. Na tym etapie badań nacisk położono na porównanie właściwości betonów o tych samych udziałach masowych poszczególnych składników (cement, dodatek, woda), dlatego nie stosowano zmiennej, dobieranej indywidualnie do potrzeb konsystencji, ilości

Tabela 2. Współczynniki woda/spoiwo, woda/cement i przeliczony wg [28] współczynnik woda/spoiwo

Oznaczenia próbek	W/C	W/(C+P)	W/(C+P+k)
Seria I (0 PK/0 PF)	0,600	0,600	0,600
Seria II (25 PK/0 PF)	0,800	0,600	0,750
Seria III (0 PK/25 PF)	0,800	0,600	0,750
Seria IV (12,5 PK/12,5 PF)	0,800	0,600	0,750
Seria V (50 PK/0 PF)	1,200	0,600	1,000
Seria VI (0 PK/50 PF)	1,200	0,600	1,000
Seria VII (25 PK/25 PF)	1,200	0,600	1,000
Seria VIII (0 PK/0 PF)	0,600	0,600	0,600

wody ani domieszek uplastyczniających. Tym samym, betony serii V–VII nie spełniają w pełni definicji betonów wysokopopiołowych.

Użyto cementów CEM I 32,5 (czysty, bez popiołu) i CEM II/BV R-HSR (z 27% popiołu) z cementowni Ożarów. Pozwoliło to na bezpośrednie porównanie wytrzymałości betonu, w którym część czystego cementu CEM I zastąpiono popiołem, z wytrzymałością betonu wykonanego z dostępnego w handlu cementu popiołowego CEM II. Stosowany w badaniach popiół konwencjonalny spełniał wymagania dla popiołu do betonu wg [15].

Wszystkie badane betony wykonano w betoniarnie wolnostopadowej o pojemności 250 litrów. Najpierw dozowano składniki suche: kruszywo, cement i popiół, a na koniec wlewano potrzebną ilość wody. Czas mieszania wynosił 8 minut. Po wymieszaniu badana była konsystencja metodą stolika rozpliwowego wg normy [29]. Wyniki badania konsystencji przedstawiono w tabeli 3. Beton układano w formach stalowych w dwóch warstwach po około połowie wysokości formy. Po umieszczeniu w formach beton został zagęszczony na stole wibracyjnym. Czas wibrowania wyniósł 2 razy po 20 sekund. Po 48 godzinach próbki rozformowano i umieszczono w wodzie na kolejne 26 dób do badania wytrzymałości na ściskanie i rozłupywanie po 28 dniach.

Tabela 3. Wyniki badania rozpliwu

Oznaczenia próbek	Średnica rozpliwu [cm]	klasa
Seria I (0 PK/0 PF)	46	F3
Seria II (25 PK/0 PF)	48	F3
Seria III (0 PK/25 PF)	39	F2
Seria IV (12,5 PK/12,5 PF)	44	F3
Seria V (50 PK/0 PF)	30	F1
Seria VI (0 PK/50 PF)	17,5	F1
Seria VII (25 PK/25 PF)	25,5	F1
Seria VIII (0 PK/0 PF)	45,5	F3

Zaplanowano następujące badania:

- wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, 6 próbek sześciennych o boku 15 cm;
- wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach, 6 próbek sześciennych o boku 15 cm;
- wytrzymałość na rozciąganie przez rozłupywanie po 28 dniach, 6 próbek sześciennych o boku 15 cm;
- sorpcyjność wyznaczana po 120 dniach metodą masową na połowach próbek sześciennych (po rozłupywaniu) o boku 15 cm.

Badania wytrzymałości na ściskanie wykonano wg normy [30], wytrzymałości na rozciąganie przez rozłupywanie – wg normy [31].

Badania sorpcyjności przeprowadzono metodą masową, na 6 próbkach dla każdej serii, po 120 dniach od betonowania. próbki zostały wysuszone w temperaturze 105°C, następnie zważone i umieszczone w naczyniach, które umożliwiły stały dostęp wody do dolnej płaskiej powierzchni próbki (płaskie naczynie z siatką na dnie). Do naczyń



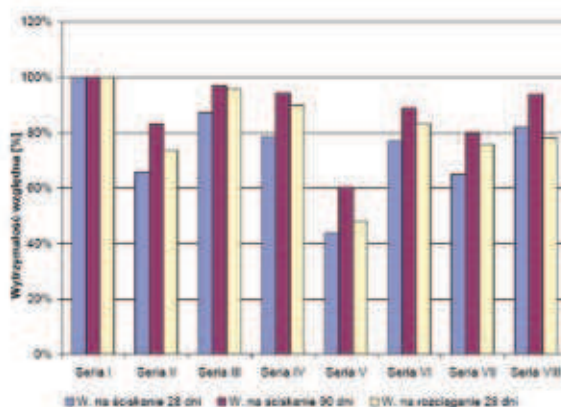
Rys. 1. Badanie sorpcyjności metodą masową

nalano wody destylowanej do poziomu około 5 mm powyżej dolnej krawędzi próbek. Następnie zważono próbki po 15 minutach, po pół godzinie i dalej co godzinę. W razie potrzeby dolewano wody destylowanej, tak aby dolna krawędź była stale około 5 mm poniżej poziomu wody w naczyniu. Wyniki pomiarów zostały opracowane zgodnie z założeniami metody badawczej [32–34]. Badanie przedstawiono na rysunku 1.

3. Wyniki badań

W tabeli 4 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach i po 90 dniach oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach. Każdy wynik jest średnią arytmetyczną wyciągniętą z wyników cząstkowych osiągniętych dla 6 próbek dla każdej serii.

Na rysunku 2 zestawiono procentowe wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach i po 90 dniach oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach w odniesieniu do wytrzymałości serii I, to jest wykonanej z samym cementem CEM I, dla której przyjęto wartość 100%. Jak się spodziewano, zarówno beton wykonany z cementu CEM II, jak i wszystkie serie z dodatkiem popiołów osiągnęły niższe wartości wytrzymałości na ściska-



Rys. 2. Procentowa wytrzymałość betonów z dodatkiem popiołów w stosunku do wytrzymałości betonu z czystym cementem CEM I (100%)

Tabela 4. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 28 i 90 dniach i wytrzymałości na rozciąganie przez rozluptywanie po 28 dniach

Oznaczenia próbek	Ściskanie 28 dni [MPa]	Ściskanie 90 dni [MPa]	Rozluptywanie [MPa]
Seria I (0 PK/0 PF)	35,91	46,13	4,01
Seria II (25 PK/0 PF)	23,57	38,28	2,94
Seria III (0 PK/25 PF)	31,31	44,70	3,84
Seria IV (12,5 PK/12,5 PF)	28,21	43,51	3,61
Seria V (50 PK/0 PF)	15,66	27,83	1,93
Seria VI (0 PK/50 PF)	27,60	41,06	3,33
Seria VII (25 PK/25 PF)	23,33	36,82	3,04
Seria VIII (0 PK/0 PF)	29,50	43,27	3,13

nie i rozciąganie niż seria I z cementem CEM I, co wynika z wolniejszego w czasie ujawniania się aktywności pucolanowej popiołów w porównaniu do właściwości wiążących cementu. Największe spadki 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie i rozluptywanie w porównaniu do wyniku dla próbki kontrolnej serii I zanotowano dla betonu wysokopopiołowego serii V, a więc wykonanego z dużym udziałem 50% popiołu konwencjonalnego. Znacznie mniejszy spadek wytrzymałości wystąpił dla betonów wysokopopiołowych serii wykonanych z popiołem fluidalnym, a także z mieszanką popiołów konwencjonalnego i fluidalnego, przy czym lepsze wyniki osiągnięto w przypadku samego popiołu fluidalnego. Zauważyć należy, że w przypadku betonów wysokopopiołowych wykonanych z udziałem popiołu fluidalnego (serie VI i VII) osiągnięto wyniki porównywalne lub wyższe niż dla betonu wykonanego tylko z 25% dodatkiem popiołu konwencjonalnego (seria II). Na uwagę zasługują też serie III i IV (z 25% zawartością popiołów), dla których wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach i wytrzymałość na rozciąganie po 28 dniach są wyższe od wytrzymałości, którą osiągnęła seria VIII z cementem popiołowym CEM II [35].

W tabeli 5 zaprezentowano wyniki badań sorpcyjności betonu. Wyniki pomiaru metodą masową pokazują, że sorpcyjność betonu z CEM I bez dodatku popiołu jest praktycznie równa (różnica 0,4%) sorpcyjności betonu z cementem CEM II. Sorpcyjność betonów z dodatkiem popiołów wykazuje następujące prawidłowości:

Tabela 5. Wyniki badanie sorpcyjności betonów

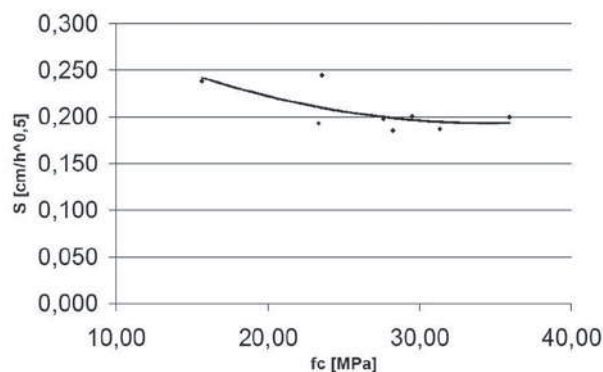
Oznaczenia próbek	Sorpcyjność [cm/h ^{0,5}]	Odchylenie standardowe [cm/h ^{0,5}]	Współczynnik zmienności [%]
Seria I (0 PK/0 PF)	0,1998	0,0116	5,83
Seria II (25 PK/0 PF)	0,2449	0,0160	6,54
Seria III (0 PK/25 PF)	0,1871	0,0035	1,90
Seria IV (12,5 PK/12,5 PF)	0,1856	0,0127	6,82
Seria V (50 PK/0 PF)	0,2383	0,0231	9,70
Seria VI (0 PK/50 PF)	0,1981	0,0059	2,99
Seria VII (25 PK/25 PF)	0,1932	0,0075	3,87
Seria VIII (0 PK/0 PF)	0,2005	0,0057	2,86

- w betonach z dodatkiem popiołu konwencjonalnego następuje zwiększenie sorpcyjności, wynoszące około 20% – betony II i V serii;

- w serii z popiołem fluidalnym i mieszanką popiołów nastąpił kilkuprocentowy spadek sorpcyjności.

Zwraca uwagę niski rozrzut wyników badania metodą wagową. Współczynnik zmienności wynosi 6,54%, 9,70% w serii z dodatkiem popiołu konwencjonalnego czyli odpowiednio II, V. W pozostałych seriach wynosi od 1,9% do 6,82%, co jest niską wartością przy badaniu sorpcyjności.

Rysunek 3 przedstawia zależność sorpcyjności betonu od jego wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach. Jak widać, sorpcyjność spada wraz ze zwiększeniem wytrzymałości betonu na ściskanie, co potwierdza poprzednio uzyskane wyniki w pracach [32, 33] i pokazuje, że zastąpienie części cementu popiołem nie ma wpływu na charakter tej zależności [35].



Rys. 3. Zależność pomiędzy sorpcyjnością i wytrzymałością betonu na ściskanie

4. Podsumowanie i wnioski

Na właściwości betonów ma wpływ wiele czynników, z których wymienić należy: skład ilościowy mieszanki, rodzaj stosowanego popiołu, ilość wody, konsystencję, warunki pielęgnacji. Lepsze parametry betonów wykonanych z udziałem popiołu fluidalnego mogą wynikać z większej jego aktywności w porównaniu do popiołu konwencjonalnego. Ponadto bardzo porowate ziarna popiołu fluidalnego chłoną wodę, co skutkuje obniżeniem realnego stosunku woda/cement w początkowym okresie w porównaniu do materiału wykonanego z identyczną ilością wody, lecz zawierającego jako dodatek jedynie popiół konwencjonalny.

W szczególności, wykonane badania pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Konsystencja badanych betonów wykonanych z mieszanką popiołów konwencjonalnego i fluidalnego zastępującą 25% cementu jest bardzo zbliżona do konsystencji betonu z cementem CEM I lub CEM II bez dodatkowego popiołu. Wprowadzenie większych ilości popiołu do betonu jako zamiennik części cementu ma znacznie większy wpływ na konsystencję i wyma-

ga korekty składu mieszanki w celu uzyskania właściwej konsystencji i urabialności.

2. Zastąpienie 25% masy cementu popiołem konwencjonalnym powoduje zmniejszenie wytrzymałości i zwiększenie sorpcyjności w porównaniu z betonem wykonanym z cementu CEM I i CEM II. Natomiast zastosowanie popiołu fluidalnego lub mieszanki popiołów konwencjonalnego i fluidalnego w charakterze zamiennika 25% masy cementu powoduje mniejszą redukcję 28-dniowej wytrzymałości i jednoczesny spadek sorpcyjności w porównaniu z betonem wykonanym z cementu CEM I.

3. Wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach i wytrzymałość na rozłupywanie betonu, w którym 25% masy cementu zostało zastąpione popiołem fluidalnym lub mieszanką popiołów konwencjonalnego i fluidalnego jest nieznacznie większa, zaś sorpcyjność jest nieco niższa niż betonu kontrolnego z cementem CEM II.

4. Zastąpienie 50% masy cementu popiołem powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach (znaczny w przypadku, gdy stosowany jest sam popiół konwencjonalny), ale nie skutkuje zwiększeniem sorpcyjności (wyjątkiem jest beton zawierający sam popiół konwencjonalny). W przypadku wytrzymałości na rozłupywanie, próbki z popiołem fluidalnym osiągają wartości porównywalne lub wyższe od wyników zarejestrowanych dla betonu kontrolnego wykonanego z CEM II.

5. Po 90 dniach hydratacji wytrzymałość na ściskanie betonu z 50% popiołu fluidalnego jest zbliżona do wartości rejestrowanej dla betonu kontrolnego wykonanego z cementu CEM II.

6. W przypadku betonów wysokopopiołowych można oczekiwać, że optymalizacja ich składu (w tym zastosowanie upłynniaczy i/lub aktywatorów), jak też dopracowanie warunków pielęgnacji pozwoli na uzyskiwanie lepszych rezultatów.

Prezentowane badania stanowią prace wstępne nad zastosowaniem różnych popiołów, także tych o niestandardowych właściwościach, w betonach o wyższej niż typowa zawartości dodatku popiołu. Aby móc przewidywać właściwości takich betonów i kierunki ewentualnej ich aktywacji, równoległe prowadzone są badania hydratacji spoiw oraz właściwości fizykochemicznych uzyskanych materiałów.

BIBLIOGRAFIA I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

[1] Giergiczny Z., Cementy z dodatkami mineralnymi składnikiem trwałego betonu, *Inżynieria i Budownictwo*, 2010, nr 5–6, s. 275–279
 [2] Tkaczewska E., Małolepszy J., Właściwości szkła w krzemionkowych popiołach lotnych, *Cement Wapno Beton*, 2009, nr 3, s. 148–153
 [3] Giergiczny E., Giergiczny Z., Wpływ zmiennej jakości popiołów lotnych na właściwości kompozytów cementowo-popiołowych, *Cement Wapno Beton*, 2010, nr 3, s. 157–163
 [4] Bukowska M., Kolczyńska L., Badania zdolności ochronnych otuliny zbrojenia z zapraw cementowych z dodatkiem popiołu lotnego, *Inżynieria i Budownictwo*, 2012, nr 1, s. 24–26
 [5] Freidenberg E., Freidenberg P., Właściwości reologiczne mieszanek do betonowania podwodnego modyfikowanych popiołami lotnymi, *Inżynieria i Budownictwo*, 2009, nr 5, s. 278–280
 [6] Horszczaruk E., Łukowski P., Betony podwodne – badania i dobór składu, *Inżynieria i Budownictwo*, 2009, nr 5, s. 274–278

[7] Gołaszewski J., Ponikiewski T., Popiół lotny wapienny składnikiem betonów nowej generacji, XVIII Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki, Zakopane, 2011, s. 89–105
 [8] Hawrot K., Żak A., Giergiczny Z., Popiół lotny wapienny jako dodatek typu II w składzie betonu, XVIII Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki, Zakopane, 2011, s. 107–125
 [9] Garbacik A., Baran T., Drożdż W., Możliwości waloryzacji popiołów lotnych wapiennych pod kątem zastosowania w technologii cementu, XVIII Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki, Zakopane, 2011, s. 127–141
 [10] Jackiewicz-Rek W., Betony wysokopopiołowe, *Materiały Budowlane*, 2010, nr 10, s. 18–20
 [11] Bentz D.P., Sato T., de la Varga I., Weiss W. J., Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures, *Cement and Concrete Composites*, 2012, vol. 34, s. 11–17
 [12] Wang Q., Feng J., Yan P., The microstructure of 4-year-old hardened cement-fly ash paste, *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 29, s. 114–119
 [13] Bentz D. P., Ferraris C. F., Rheology and setting of high volume fly ash mixtures, *Cement and Concrete Composites*, 2010, vol. 32, s. 265–270
 [14] Papayianni I., Anastasiou E., Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products, *Construction and Building Materials*, 2010, vol. 24, s. 1412–417
 [15] PN-EN 450-1+A1:2009 Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
 [16] Pacewska B., Wilińska I., Kubissa W., Nowacka M., Popiół fluidalny – zalety i zagrożenia jego zastosowania w kompozytach cementowych, XVII Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki, Warszawa, 2010, s. 235–250
 [17] Roszczynialski W. (jr), Roszczynialski W., Kabała J., Brzozowski B., Wpływ selektywnego odbioru i separacji ziarnowej popiołów fluidalnych z Elektrowni Turów na wartość tych popiołów jako dodatków do cementu, XVIII Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki, Zakopane, 2011, s. 55–68
 [18] Hycnar J. J., Czynniki wpływające na właściwości fizykochemiczne i użytkowe stałych produktów spalania paliw w paleniskach fluidalnych, *Wydawnictwo Górnicze, Katowice* 2006
 [19] ČSN P 72 2081 Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely
 [20] Pacewska B., Blonkowski G., Wilińska I., Studies on the pozzolanic and hydraulic properties of fly ashes in model systems, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2008, vol. 94, s. 469–476
 [21] Pacewska B., Blonkowski G., Wilińska I., Investigations of the influence of different fly ashes on cement hydration, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2006, vol. 86, s. 179–186
 [22] Anthony E. J., Bulewicz E.M., Dudek K., Kozak A., The long term behaviour of CFBC ash–water systems, *Waste Management*, 2002, vol. 22, s. 99–111
 [23] Roszczynialski W., Nocuń-Wczelik W., Studies of cementitious systems with new generation by-products from fluidised bed combustion, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2004, vol 77, s. 151–158
 [24] Rajczyk K., Giergiczny E., Glinicki M. A., Use of DTA in the investigations of fly ashes from fluidized bed boilers, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2004, vol 77, s. 165–170
 [25] Aprobata Techniczna IBDiM nr AT/2003–04–1536 Dodatek FLUBET i domieszka uplastyczniająca – napowietrzająca do modyfikacji betonu i stabilizacji kruszyw cementem oraz modyfikacji zaczynów cementowych
 [26] Aprobata Techniczna ITB AT-15-5257/2004 Dodatek FLUBET do modyfikacji betonu
 [27] Rajczyk K., Mieszajmy popioły! Aspekty naukowo-praktyczne uszlachetniania popiołów, Międzynarodowe Seminarium Naukowo-Techniczne „Przetwarzanie i wykorzystanie popiołów wysokowapniowych”, Bełchatów, 2006, s. 107–118
 [28] PN-EN-206-1: 2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
 [29] PN-EN 12350-5:2001 Badania mieszanki betonowej. Część 5: Badanie konsystencji metodą stolika rozplywowego
 [30] PN-EN 12390-3:2002 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania
 [31] PN-EN 12390-6:2001 Badania betonu. Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badania
 [32] Kubissa W., Sorpcyjność betonu jako parametr oceny trwałości konstrukcji żelbetowych. Praca doktorska. Politechnika Warszawska, 2001
 [33] Kubissa W., Sorpcyjność betonu a trwałość konstrukcji żelbetowych. *Inżynieria i Budownictwo*, 2010, nr 10, s. 558–560
 [34] Pietrzak K., Porównanie i ocena metod badania sorpcyjności betonu. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 2006.
 [35] Kubissa W. Wilińska I. Pałuba M., Zastosowanie popiołów jako dodatku do betonu. *Płockie Forum Budowlane*, 2012, s. 109–118