

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI BETONU WYPRODUKOWANEGO Z DODAKIEM POPIOŁU LOTNEGO

Gabriela Rutkowska¹, Ilona Małuszyńska², Marcin Rosa

¹ Katedra Inżynierii Budowlanej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: gabriela_rutkowska@sggw.pl

² Katedra Kształtowania Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: ilona_maluszynska@sggw.pl

STRESZCZENIE

Dbłość o środowisko zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju wprowadza możliwość i potrzebę stosowania recyklingu odpadów. Największe możliwości ponownego zagospodarowania popiołów lotnych ma sektor budowlany – branża materiały budowlane. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości (konsystencji, nasiąkliwości, wodoszczelności oraz wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania) betonów zwykłych oraz betonów zawierających w swoim składzie maksymalną ilość popiołów lotnych. Prowadzone badania wykazały przydatność popiołu lotnego jako surowca do produkcji betonów.

Słowa kluczowe: odpady przemysłowe, popiół lotny, beton zwykły, beton z dodatkiem.

RESEARCH OF PROPERTIES OF CONCRETE WITH THE USE OF FLY ASH

ABSTRACT

Taking care of the environment in accordance with the principles of sustainable development introduces the possibility and the need for waste recycling. The greatest potential for reuse of waste has the construction industry – building materials industry. The article presents the results of selected properties (consistency, water absorption, water resistance and compressive strength after 28 days of ripening) of ordinary concretes and concretes containing in its composition the maximum amount of fly ash. Studies have demonstrated the usefulness of fly ash as a substrate for the production of concrete components.

Keywords: industrial waste, fly ash, concrete, concrete with addition.

WPROWADZENIE

Wyczerpywanie się kopalni i wymogi ochrony środowiska sprawiły konieczność opracowania i ustanowienia strategicznych celów dla państw w Unii Europejskiej na najbliższe lata w ramach „Europa 2020”. Wprowadzanie rozwiązań innowacyjnych obejmuje między innymi sektor energetyczny. Światowa energetyka poszukuje alternatywnych źródeł energii odnawialnych. Obok paliwa konwencjonalnego jakimi są

węgiel brunatny i kamienny, z powodzeniem stosuje się spalanie biomasy bądź jej współspalanie [Golec *wsp.* 2007, Małuszyńska *i wsp.* 2013]. Powstające w wyniku spalania uboczne produkty spalania (UPS) z energetyki zawodowej były przez wiele lat zagospodarowywane przez składowanie na powierzchni lub lokowane w podziemiach kopalń. Ta forma zagospodarowania popiołów może jednak prowadzić do zanieczyszczenia wód powierzchniowych i podziemnych, w wyniku przenikania składników ługowalnych z odpadów w rejon ich składowania [Rosik-Dulewska *i Karwaczyńska* 2008].

Stąd też potrzeba badań, w ramach których poznamy możliwości zastosowania popiołów lotnych pozyskiwanych jako produkt uboczny procesu spalania paliw. Poniżej przedstawiono przykłady takich badań obejmujących m.in.:

- ocenę składu chemicznego materiałów odpadowych ze spalania węgla kamiennego w aspekcie możliwości ich rolniczego i środowiskowego wykorzystania [Czech *i wsp.* 2013],
- ocenę plonu i chemizmu roślin w ramach wielowariantowego doświadczenia na modelowym złożu opadów paleniskowych energetyki węglowej [Siuta *i Dyguś* 2013],
- określenie wpływu podwyższonej temperatury na właściwości zawieszin popiołowo-wodnych oraz popiołowo-wodno-cementowych dla określenia zachowania się tego typu mieszanin w specyficznych warunkach kopalń podziemnych [Pomykała *i wsp.* 2013],
- ocenę możliwości zastosowania popiołów lotnych w recyklingu materiałowym (surowcowym) wykorzystywanym w budownictwie.

Branżą o największym potencjale do ewentualnego zagospodarowania odpadów przemysłowych w ramach recyklingu materiałowego jest budownictwo. Sektor budowlany cechuje duża materiałochłonność, a ograniczona ilość surowców naturalnych sprawia, iż ciągle prowadzone są badania nad możliwością ich zastąpienia innymi powszechnie występującymi składnikami. Cechą przemysłu materiałów budowlanych jest również dążenie do ciągłego polepszenia właściwości wytwarzanych materiałów. Jednym z głównych kierunków poszukiwań surowców do produkcji nowoczesnych materiałów budowlanych stały się odpady przemysłowe. Dążenie do efektywnego i ekologicznego wykorzystania surowców to jedno z głównych założeń „budownictwa zrównoważonego” [Pawłowski 2006] opartego na zasadach rozwoju zrównoważonego.

METODYKA BADAWCZA

Celem badań było poznanie wpływu dodania popiołów lotnych w czasie sporządzania mieszanki betonowej betonu zwykłego na jego właściwości techniczne. Próbkę betonu do badań zaprojektowano jako beton zwykły zgodnie z normą „PN-

-EN-206-1:2003 Beton część 1: wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”. W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano mieszanki betonowe (betonu) klasy C20/25 o konsystencji F5 - konsystencja półciekła. Mieszanki zaprojektowano przy użyciu programu „Beton 4.1”. Do przygotowania próbek betonu wykorzystano kruszywo normalne o uziarnieniu 0,125–16 mm oraz cement portlandzki 42,5R bez domieszek.

WYMAGANIE PARAMETRY POPIOŁU LOTNEGO JAKO SUROWCA DO PRODUKCJI BETONU

Popioły lotne są jednym z głównych produktów ubocznych spalania. Zgodnie z normą PN-EN 450-1+A1:2009: Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicja, specyfikacje i kryteria zgodności „popiół lotny (UPS) to drobno uziarniony pył, składający się głównie z kulistych, zeszkliwionych ziaren, otrzymany przez spalanie pyłu węglowego, przy udziale lub bez udziału materiałów współspalanych, wykazujący właściwości pucolanowate, zawierający przede wszystkim SiO_2 i Al_2O_3 .”

Zwiększenie udziału surowców UPS do produkcji betonów umożliwia zmniejszenie użycia kosztownego w produkcji cementu oraz kruszywa naturalnego. Jednocześnie popiół ma korzystny wpływ na niektóre cechy betonu. Czynniki te sprawiają, iż wytwarzanie betonów popiołowych jest atrakcyjne zarówno dla producentów jak i odbiorców końcowych.

Możliwości oraz zakres stosowania popiołów lotnych do produkcji betonów są określone normami. Obowiązującymi w Polsce normami regulującymi możliwość stosowania popiołów do wyrobu betonów są:

- PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność;
- PN-EN 450-1: 2012 Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności;
- PN-EN 197-1:2012, Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku;
- PN-EN 450-2 : 2006, Popiół lotny do betonu. Część 2: Ocena zgodności.

W normie PN-EN 450-1+A1:2009 zawarto szczegółowe wymagania odnośnie składu chemicznego oraz właściwości fizycznych popiołów lotnych. W tabeli 1 przedstawiono wymagania popiołów lotnych stosowanych do produkcji betonów.

Najlepsze właściwości betonów popiołowych uzyskuje się przy zastosowaniu popiołu lotnego do 33% w stosunku do masy cementu. W Polsce granica ilości popiołu w stosunku do masy cementu na poziomie 0,33 wg. PN-EN 206-1: 2003 ustalona jest jako maksymalna ilość popiołu lotnego.

Tabela 1. Wymagania popiołu lotnego stosowanego do produkcji betonów wg PN-EN 450-1+A1:2009

Właściwości chemiczne	Wymagania	
	Popiół otrzymany wyłącznie przez spalanie pyłu węglowego	Popiół otrzymywany wyłącznie przez współspalanie
Straty prażenia [% masy]: kategoria A kategoria B kategoria C	≤ 5,0 2,0 – 7,0 4,0 – 9,0	
Chlorki [%]	≤ 0,10	
SO ₃ [%]	≤ 3,0	
CaO wolny [%]	≤ 2,5 ¹⁾	
CaO reaktywny [%]	≤ 10	
SiO ₂ [%]		≥ 25
Al ₂ O ₃ [%]		–
Fe ₂ O ₃ [%]		–
Sumaryczna zawartość tlenków: SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ [%]	Określenie zawartości nie jest konieczne	≥ 75
MgO [%]	Należy przyjąć, że wymaganie jest spełnione	≤ 4,0
Na ₂ O _{eq} [%]		≤ 5,0
Zawartość rozpuszczalnych związków fosforu w przeliczeniu na P ₂ O ₅ [%]		≤ 100 mg/kg
Właściwości fizyczne	Wymagania	
Miałość [%] Kategoria N Kategoria S	Pozostałość na sicie o oczkach 0,045 mm przy przesiewaniu na mokro wg PN-EN 451-2 ≤ 40 ≤ 12	
Wskaźnik aktywności puculanowej - po 28 dniach - po 90 dniach	≥ 75% ≥ 85%	
Stąłość objętości	≤ 10 mm ²⁾	
Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Maksymalna różnica ±200kg/m ³ w stosunku do wartości zadeklarowanej przez producenta oznaczonej zgodnie z PN-EN 196-6	
Początek wiązania	Popiół lotny otrzymany przez spalanie wyłącznie pyłu węglowego należy uważać za spełniający to wymaganie	Nie powinien być dwukrotnie dłuższy niż początek wiązania zaczynu wykonanego w 100% z masy cementu porównawczego
Wodoządnosc [%]	≤ 95% wodoządnosci cementu porównawczego	

Objasnienia:

- 1) Popiół lotny, w którym zawartość wolnego CaO jest większa niż 1,0% masy, lecz nie większa niż 2,5% może być akceptowany pod warunkiem zachowania stałości objętości – próba Le Chateliera ≤ 10 mm.
- 2) Jeżeli zawartość wolnego tlenu wapnia w popiele lotnym nie przekracza 1,0% masy, powyższe wymaganie należy uważać za spełnione.

PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Wykazano wpływ dodania popiołów lotnych na właściwości betonów zwykłych wykonanych bezpośrednio na budowie oraz określono możliwość wykonania dobrej jakości betonów bez dodatków oraz betonów z dodatkiem popiołów lotnych. Próbkę wykonano z cementu portlandzkiego typu I bez domieszek oraz popiołów ze spalania węgla w elektrociepłowni Siekierki. Popiół spełniał wymagania określone w normie PN-EN 450-1+A1:2009 odnośnie wymagań popiołów stosowanych do produkcji betonów.

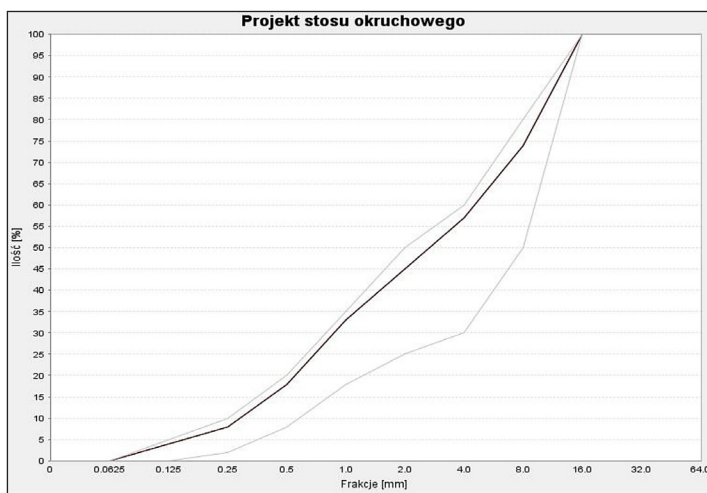
Badania polegały na porównaniu właściwości betonów zwykłych wytwarzanych w tradycyjny sposób oraz betonów zawierających w swoim składzie Uboczne Produkty Spalania (UPS) – popioły lotne. Przygotowano dwa rodzaje próbek:

- beton bez żadnych dodatków (ozn. B),
- beton z dodatkiem popiołów lotnych (ozn. PŁ).

Obydwie mieszanki betonowe przygotowano w laboratorium budowlanym Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW. Zgodnie z normą PN-EN 206-1:2003 sprawdzono właściwości mieszanki betonowej oraz stwardniałego betonu jak:

- konsystencja mieszanki betonowej,
- nasiąkliwość betonu,
- wodoszczelność betonu,
- wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.

Zarówno w próbkach nie zawierających dodatków, jak i w próbkach z dodatkiem popiołów lotnych zachowano stały skład granulometryczny kruszywa – procentową zawartość poszczególnych frakcji (tab. 2). Projekt stosu okruchowego przedstawiono na rysunku 1. Próbkę z dodatkiem UPS zawierała 30% popiołu lotnego w stosunku do masy cementu.



Rys. 1. Projekt stosu okruchowego na podstawie programu „Beton 4.1”

Tabela 2. Procentowy udział poszczególnych frakcji kruszywa w mieszance betonowej na podstawie programu „Beton 4.1”

Frakcja [mm]	Procentowy udział [%]
0,125 – 2	45
2 – 4	12
4 – 8	17
8 – 16	26

ZAŁOŻENIA DO PROJEKTOWANIA MIESZANKI BETONOWEJ

Do przyjętych założeń projektowania mieszanki betonowej betonu zwykłego bez dodatków i z dodatkiem popiołu lotnego przy użyciu programu komputerowego „Beton 4.1”, ustalono receptury mieszanek betonowych (tab. 3, 4):

1. Beton zwykły bez dodatków:
 - beton klasy C20/25,
 - cement portlandzki CEM I 42,5R bez dodatków,
 - konsystencja mieszanki betonowej: S5 - półciekła,
 - kruszywo naturalne.
2. Beton z dodatkiem popiołów lotnych:
 - beton klasy C20/25,
 - cement portlandzki CEM I 42,5R bez dodatków,
 - konsystencja mieszanki betonowej: S5 - półciekła,
 - kruszywo naturalne.

Tabela 3. Receptura mieszanki betonowej bez dodatków na podstawie programu „Beton 4.1”

Składniki mieszanki	Receptura robocza [kg/1000l]
Kruszywo	1552
Woda	247
Cement	488
Dodatki	0

Tabela 4. Receptura mieszanki betonowej z dodatkiem popiołów lotnych na podstawie programu „Beton 4.1”

Składniki mieszanki	Receptura robocza [kg/1000l]
Kruszywo	1386
Woda	264
Cement	431
Dodatki	142

Po ustaleniu receptury, wykonano mieszanki betonowe a następnie przeprowadzono badania laboratoryjne.

Badanie konsystencji mieszanki betonowej

Badanie konsystencji mieszanek betonowych wykonano zgodnie z normą PN-EN 12350-2: 2011 (Fot. 1).



Fot. 1. Badanie konsystencji metodą stożka opadowego

Wyniki pomiarów konsystencji metodą stożka opadowego dla betonu bez domieszek oraz dla betonu z domieszką popiołów lotnych przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki pomiaru konsystencji mieszanek betonowych metodą stożka opadowego

Mieszanka betonowa		
Typ	bez domieszek	z dodatkiem popiołów lotnych
Wielkość opadu	22 cm = 220 mm	24 cm = 240 mm
Klasa konsystencji	S5	S5

Beton bez domieszek charakteryzował się symetrycznym opadem wynoszącym 22 cm. Dla mieszanki z domieszką popiołów lotnych zmierzony opad wyniósł 24 cm. Pomimo, że obie mieszanki mają konsystencję S5, można zaobserwować, iż zastosowanie w mieszance betonowej popiołów lotnych wpływa na jego upłynnienie bez dodania dodatkowej ilości wody. Mieszanka z dodatkiem popiołów posiada lepszą mieszalność, a także dłuższy czas wiązania, co jest cechą pożądaną w przypadku

produkcji elementów betonowych gęsto zbrojonych, a także podczas transportowania mieszanki betonowej na większe odległości.

Badanie nasiąkliwości betonu

Nasiąkliwość betonów jest zjawiskiem niepożądanym, ponieważ obniża jego odporność i może prowadzić do większej podatności na działanie mrozu. Nasiąkliwość nie powinna być większa niż 5% dla betonów narażonych na działanie czynników atmosferycznych i 9% dla betonów osłoniętych przed działaniem czynników atmosferycznych [red. Mizera, 2000].

W celu sprawdzenia nasiąkliwości przygotowano po 4 próbki każdego rodzaju mieszanki. Pomiędzy 3 a 28 dniem twardnienia, próbki całkowicie zanurzono w wodzie, w temperaturze $\sim 20^{\circ}\text{C}$. Zgodnie z normą PN-EN 12390-2:2011 badanie nasiąkliwości próbek rozpoczęto bezpośrednio po zakończeniu okresu ich dojrzewania. Po 28 dniach próbki wyjęto z wody, wytarto do sucha oraz zważono. Następnie próbki poddano suszeniu w komorze badań cieplnych KBC 125G w temperaturze 110°C , aż do otrzymania stałej masy. Po osuszeniu próbki ponownie zważono. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabelach 6 i 7.

Tabela 6. Nasiąkliwość próbek betonowych bez dodatków

Oznaczenie próbki	Masa próbki w stanie nasycenia wodą m_n [kg]	Masa próbki w stanie suchym m_s [kg]	Nasiąkliwość η_w [%]
B1	2,308	2,192	5,53
B2	2,259	2,137	5,72
B3	2,301	2,174	5,80
B4	2,274	2,156	5,49
Nasiąkliwość średnia:			5,63

Tabela 7. Nasiąkliwość próbek betonowych z dodatkiem popiołów lotnych

Oznaczenie próbki	Masa próbki w stanie nasycenia wodą m_n [kg]	Masa próbki w stanie suchym m_s [kg]	Nasiąkliwość η_w [%]
P1	2,227	2,118	5,14
P2	2,216	2,112	4,94
P3	2,226	2,123	4,86
P4	2,215	2,111	4,91
Nasiąkliwość średnia:			4,96

Z przeprowadzonych badań wynika, iż zastosowanie dodatku popiołów lotnych zmniejsza jego nasiąkliwość. Popiół lotny zmniejsza ilość wolnych porów w gotowych betonach, dzięki czemu betony popiołowe w mniejszym stopniu chłoną wodę.

Badanie wodoszczelności betonu

Wodoszczelnością betonu określa jego zdolność do przeciwstawiania się przepływowi wody będącej pod ciśnieniem. Wodoszczelność suchego betonu zależy głównie od jego porowatości. Próbę wodoszczelności betonów zgodnie z normą PN-EN 12390-8:2011 dokonuje się poprzez badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem po 28 dniach.

Badanie wodoszczelności wykonano dla próbek sześciennych 150x150x150mm. Po 28 dniach dojrzewania próbek betonowych powierzchnia boczna próbek została poddana działaniu wody pod stałym ciśnieniem 500 ± 50 kPa przez okres 72 godzin. Po wykonaniu badania próbki rozłupano i zmierzono głębokość penetracji wody.

Głębokość penetracji wody po 28 dniach dla próbek betonowych bez dodatków wyniosła 4,31 cm (Fot. 2), natomiast dla próbek z dodatkami popiołów lotnych 2,53 cm. Wszystkie próbki spełniły wymagania normy (PN-EN 12390-8:2011) odnośnie głębokości penetracji wody ustalonej na poziome 5cm. Obydwa rodzaje betonów można uznać zatem za spełniające kryterium wodoszczelności. Stwierdzono, że betony z zawartością popiołów lotnych charakteryzuje mniejsza penetracja wody najprawdopodobniej spowodowana uszczelnieniem betonu przez popioły. Popiół wypełnił wolne pory w betonie, zwiększając jego wodoszczelność.



Fot. 2. Poziom penetracji wody po 28 dniach w próbkach betonowych bez dodatków

Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie

Badanie wytrzymałości próbek betonowych na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-3: 2011/AC: 2012 w maszynie wytrzymałościowej (fot. 3). Badania przeprowadzono na próbkach typu B – kostki sześciennie o boku 150 mm.



Fot. 3. Badanie wytrzymałości próbek na ściskanie w maszynie wytrzymałościowej

Tabela 8. Wyniki wytrzymałościowe próbek na ściskanie

Betón bez dodatków						
Oznaczenie	Masa próbki [kg]	Wymiary podstawy próbki [mm]		Wysokość próbki [mm]	Wartość siły niszczącej [kN]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
B1	7,762	150,75	148,73	150,97	753	33,5
B2	7,783	150,54	149,01	150,83	772,3	33,9
B3	7,771	150,41	148,93	150,87	771,4	34,4
B4	7,778	150,43	149,09	150,86	764	33,7
B5	7,772	150,48	148,92	150,83	771,8	34,2
Średnia wytrzymałość na ściskanie:						33,94
Betón z dodatkiem popiołów lotnych						
Oznaczenie	Masa próbki [kg]	Wymiary podstawy próbki [mm]		Wysokość próbki [mm]	Wartość siły niszczącej [kN]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
P1	7,497	150,67	148,18	151,03	595,5	26,5
P2	7,512	150,71	149,12	151,0	621,0	27,6
P3	7,489	150,60	148,71	150,93	602,7	26,9
P4	7,502	150,54	148,58	150,88	604,3	27,0
P5	7,491	150,63	148,34	150,95	608,6	27,2
Średnia wytrzymałość na ściskanie:						27,04

Wyniki badań wytrzymałościowych przygotowanych próbek betonowych po 28 dniach dojrzewania przedstawiono w tabeli 8. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że betony popiołowe charakteryzuje mniejsza wytrzymałość od betonów zwykłych. W rozpatrywanych próbkach zawartość popiołów stanowiła 35 procent masy popiołu w stosunku do masy cementu, co jest górną zalecaną granicą stosowania popiołów w produkcji betonów. Przy takim udziale popiołów w mieszance betonowej zauważono ponad 20% spadek wytrzymałości betonów po 28 dniach dojrzewania, co stanowi dużą różnicę w wytrzymałości na ściskanie analizowanych rodzajów betonu.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zagospodarowanie popiołów w ramach recyklingu surowcowego (materiałowego) pozwoli na zmniejszenie wydobycia surowców nieodnawialnych, wpływając pozytywnie na jakość środowiska. Stosowanie popiołu w produkcji materiałów budowlanych przyczyni się do minimalizacji kosztów produkcji betonów oraz uzyskania nowych właściwości wytwarzanych materiałów.

Na podstawie wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Betony z dodatkiem popiołów lotnych są mniej podatne na działanie wody, są mniej nasiąkliwe (4,96%) i mniej podatne na penetrację wody (2,53 cm) w stosunku do betonów zwykłych. Świadczy to, że betony popiołowe powinny charakteryzować się również większą mrozoodpornością. Ze względu na klimat Polski, mrozoodporność materiałów betonowych jest cechą bardzo pożądaną, gdyż może wpłynąć na znaczne zwiększenie żywotności konstrukcji.
2. Obydwa rodzaje betonów spełniły wymagania stawiane w założeniach powyższego badania, mianowicie wyprodukowania betonu klasy C20/25. Beton zwykły uzyskał nawet klasę wyższą czyli C25/30. Ze względu na kryterium wytrzymałościowe, należy ograniczyć ilość popiołu w mieszance betonowej.
3. Wytrzymałość na ściskanie betonu zwykłego po 28 dniach dojrzewania była średnio o 20% wyższa niż betonu popiołowego b4. Wytrzymałość betonów popiołowych wraz z upływem czasu zwiększa się bardziej niż betonów zwykłych, a następnie zrównuje się z wytrzymałością betonów uzyskanych z czystego cementu.
5. Mieszanki betonów popiołowych charakteryzowała lepsza mieszalność oraz większe upłynnienie w porównaniu do betonów zwykłych, mimo tej samej grupy konsystencji. Beton z popiołem lotnym charakteryzuje również dłuższy czas wiązania, co jest pożądane w niektórych sytuacjach, np. podczas tworzenia konstrukcji silnie zbrojonych.
6. Popioły lotne mogą stanowić substytut surowców do produkcji betonów.

PIŚMIENNICTWO

1. Czech T., Gambuś F., Wieczorek J. 2013. Ocena składu chemicznego materiałów odpadowych ze spalania węgla kamiennego w aspekcie możliwości ich rolniczego i środowiskowego wykorzystania. *Inżynieria Ekologiczna*, 34, 89-95.
2. Golec T, Remiszewski K., Świątkowski B., Błesznowski M. 2007. Palniki pyłowe na biomasę. *Energetyka i ekologia*, 5. 375-382.
3. Małuszyńska I., Wodziński M, Małuszyński M.J. 2013. Wykorzystanie biomasy do celów energetycznych. Możliwości i ograniczenia. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 62, 487–497.
4. Pawłowski A. 2006. Wielowymiarowość rozwoju zrównoważonego. *Problemy Ekoro-zwoju/Problems of Sustainable Development*, 1(1), 23-32.
5. Pomykała R., Kępy W., Łyko P. 2013. Wpływ temperatury oraz dodatku cementu na czas wiązania zawieszin popiołowo –wodnych. *Rocznik Ochrony Środowiska*, 15. 1818-1833.
6. Mizera J. (red.) 2000. Ćwiczenia laboratoryjne z materiałów budowlanych i technologii betonu- Wyd. 2. popr. i uzupeł., Politechnika Opolska, Opole.
7. Rosik-Dulewska Cz., Karwaczyńska U. 2008. Metody ługowania zanieczyszczeń z odpadów mineralnych w aspekcie możliwości ich zastosowania w budownictwie hydro-technicznym. *Rocznik Ochrony Środowiska*, 10. 205-219.
8. Siuta J., Dyguś K.H. 2013. Plon i chemizm roślin wielowariantowego doświadczenia na modelowym złożu opadów paleniskowych energetyki węglowej. *Inżynieria Ekologiczna*, 35, 7-31.
9. PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
10. PN-EN 12390-2: 2011P Badania betonu Część 2: Wykonanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
11. PN-EN 12390-8: 2011P Badania betonu - Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.
12. PN-EN 12390-3: 2011/AC:2012 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
13. PN-EN 12350-2: 2011 P Badanie mieszanki betonowej - Część 2 Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
14. PN-EN 197-1: 2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
15. PN-EN 450-1+A1: 2009 Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
16. PN-EN 450-2: 2006 Popiół lotny do betonu. Część 2: Ocena zgodności.
17. Program komputerowy "Beton 4.1".