

GRZEGORZ ROLKA*
EWELINA ŚLĘZAK**

Popioły lotne dla drogownictwa w świetle aktualnych wymagań normowych

Słowa kluczowe: popiół lotny wapniowy, popiół lotny krzemionkowy, mieszanki związane spoiwem hydraulicznym, mieszanki z popiołem lotnym, właściwości fizyczno-chemiczne.

Jednym z głównych odpadów energetycznych są popioły lotne ze spalania węgla w kotłach energetycznych. Od lat podejmuje się próby wielokierunkowego zastosowania gospodarczego tych odpadów. Wykorzystanie popiołów lotnych jest uwarunkowane spełnieniem wymagań w zakresie parametrów jakościowych, zależnych od poszczególnych zastosowań. Ich zagospodarowanie przejął przemysł materiałów budowlanych, chociaż w ostatnich latach coraz większe znaczenie zaczyna odgrywać również wykorzystanie popiołów lotnych w drogownictwie. Popioły lotne od poszczególnych dostawców mogą nie spełniać wymagań określonych w normach PN-EN 450-1: Popiół lotny do betonu i PN-S-96035: Drogi samochodowe. Popioły lotne. Dla tych popiołów lotnych należy znaleźć inne zastosowanie, na przykład mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Wymagania dla popiołów lotnych stosowanych do tych mieszanek określa norma PN-EN 14227-4: Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacja: Część 4: Popioły lotne do mieszanek.

W artykule przedstawiono wyniki badań popiołów lotnych krzemionkowych i wapniowych pochodzących z różnych typów palenisk. Właściwości badanych popiołów porównano z wymaganiami głównych norm dotyczących popiołów lotnych, a w szczególności normy PN-EN 14227-4 i na tej podstawie dokonano ich oceny pod kątem przydatności do mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym.

1. Wprowadzenie

Podczas wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej w wyniku spalania węgla powstają różne odpady nazywane ubocznymi produktami spalania (UPS). Zalicza

* Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu.

** Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu.

się do nich: popioły lotne, żużle, popioły z kotłów fluidalnych, gips z odsiarczania spalin itp. Odpady te przez dziesiątki lat stanowiły poważny problem środowiskowy, bowiem stopień ich gospodarczego wykorzystania był niezadowalający, a znaczna część była deponowana na składowiskach [1].

Jednym z najważniejszych ubocznych produktów spalania są popioły lotne ze spalania węgla w paleniskach energetycznych. Od lat podejmowane są próby wielokierunkowego zastosowania gospodarczego tych odpadów. Wykorzystanie popiołów lotnych jest uwarunkowane spełnieniem wymagań w zakresie parametrów jakościowych, zależnych od poszczególnych zastosowań. Zagospodarowywane są przede wszystkim przez przemysł materiałów budowlanych. W ostatnich latach coraz większe znaczenie zaczyna odgrywać również wykorzystanie popiołów lotnych w drogownictwie. Popioły lotne od poszczególnych producentów mogą nie spełniać wymagań określonych w normach PN-EN 450-1: Popiół lotny do betonu i PN-S-96035: Drogi samochodowe. Popioły lotne. Te popioły lotne powinny znaleźć inne zastosowanie, na przykład do mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym. W tym przypadku wymagania dla popiołów lotnych określa norma PN-EN 14227-4: Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacja. Część 4: Popioły lotne do mieszanek. Wprowadzenie norm z serii PN-EN 14227 stwarza możliwości stosowania szerszej gamy popiołów lotnych, w tym także popiołów z kotłów fluidalnych [1–2].

Nowa norma PN-EN 14227-4 odnosi się do popiołów lotnych do mieszanek związanych hydraulicznie w bardzo szerokim zakresie. Popioły lotne w mieszankach związanych hydraulicznie mogą stanowić [3]:

- do 20% – jako dodatek do kruszyw polepszający uziarnienie mieszanki,
- 3–20% – jako dodatek pucolanowy lub samodzielne spoiwo,
- do 97% – jako główny składnik mieszanek popiołowych lub betonów popiołowych.

Zgodnie z PN-EN 14227-4 popioły lotne stosowane są także do waloryzacji gruntów w celu zwiększenia ich przydatności do budownictwa według PN-EN 14227-14. Popioły lotne osuszają, zwiększają nośność gruntów oraz stanowią czynnik hydrauliczny lub pucolanowy, który umożliwia wiązanie gruntów i uzsikiwanie wytrzymałości na ściskanie i mrozoodporności [2–3].

Liczba badań według normy PN-EN 14227-4 jest znacznie mniejsza niż w normach PN-S-96035 czy PN-EN 450-1, co ułatwia zakładową kontrolę produkcji. Popioły do danej odmiany można sklasyfikować na podstawie składu chemicznego. Norma PN-EN 14227-4 podaje zakres badań oraz wymagania oddzielnie dla każdej jego odmiany. Na przykład dla popiołów wapiennych nie wymaga się badania zawartości SO_3 i strat prażenia, co stwarza możliwość stosowania popiołów fluidalnych i zawierających produkty odsiarczania spalin, w których

znajduje się więcej SO_3 niż w przypadku popiołów konwencjonalnych. To, jak dany popiół będzie się zachowywał w mieszance związanej hydraulicznie, pokazuje badanie stałości objętości [2–3].

Norma określa dwie nowe cechy: aktywność pucolanową i aktywność hydrauliczną. Z punktu widzenia klasyfikacji popiołów jest to parametr bardzo ważny, wskazujący na potencjalne właściwości, jakie będzie uzyskiwała mieszanka wykonana na danym popiele lotnym. Aktywność pucolanowa i hydrauliczna ustalana jest na podstawie badań wytrzymałościowych mieszanki popiołu i standardowego kruszywa (oraz wapna jako aktywatora przy oznaczaniu aktywności pucolanowej).

2. Wymagania dla popiołu lotnego w świetle wymagań normy PN-EN 14227-4

Norma PN-EN 14227-4 podaje zakres badań dla każdej odmiany popiołu oddzielnie. Dla krzemionkowych popiołów lotnych jest to:

- uziarnienie,
- strata przy prażeniu,
- bezwodnik siarkowy (trójtlenek siarki),
- wolny tlenek wapnia i stałość objętości,
- zawartość wody,
- aktywność pucolanowa popiołu lotnego krzemionkowego.

Aktywność pucolanową określa się w zależności od wymagań konkretnego zastosowania (miejsca użycia), a wynik powinien być deklarowany. Aktywność tę określa się na podstawie pomiarów wytrzymałości na ściskanie mieszanek wapna, popiołu lotnego i standardowego kruszywa w funkcji czasu. Do momentu określenia metody badania deklarowanie tej właściwości popiołu lotnego nie jest w Polsce wymagane. Dla wapiennych popiołów lotnych jest to:

- uziarnienie,
- stałość objętości,
- reaktywny tlenek wapnia,
- zawartość wody,
- aktywność hydrauliczna popiołu lotnego krzemionkowego.

Na życzenie użytkownika producent powinien przekazać informacje dotyczące aktywności hydraulicznej popiołu lotnego wapiennego. Aktywność hydrauliczna jest określana poprzez pomiar wytrzymałości na ściskanie mieszaniny popiołu lotnego i piasku normowego.

Porównanie wymagań dla popiołu lotnego krzemionkowego według normy PN-EN 450-1: Popiół lotny do betonu oraz normy PN-EN 14227-4: Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacja. Część 4: Popioły lotne do mieszanek przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Wymagania dla popiołu lotnego krzemionkowego

Badanie	Wymagania wg PN-EN 450-1	Wymagania wg PN-EN 14227-4
Skład ziarnowy: sito 90 μm sito 45 μm	niewymagane kategoria N: ≥ 60 kategoria S: ≥ 88 [% masy przechodzącej przez sito]	≥ 70 ≥ 40 [% masy przechodzącej przez sito]
Strata prażenia	kategoria A: $\leq 5\%$ masy kategoria B: $\leq 7\%$ masy kategoria C: $\leq 9\%$ masy	$\leq 10\%$ masy
SO ₃	$\leq 3\%$	$\leq 4\%$
CaO wolny	CaO wolny $\leq 2,5\%$ masy CaO wolny $> 1\%$ masy należy zbadać stałość objętości	CaO wolny $> 1\%$ należy zbadać stałość objętości
Stażność objętości	< 10 mm	< 10 mm
Zawartość wody	niewymagane	$\leq 1\%$

Uwaga: porównano wyłącznie wymagania występujące w normie PN-EN 14227-4.

Źródło: Opracowanie własne.

3. Część doświadczalna

Badania przeprowadzono według procedur badawczych opisanych w normie PN-EN 14227-4:2005.

Badania dotyczyły następujących właściwości:

- chemicznych:
 - straty prażenia (czas prażenia 1 h),
 - zawartość siarczanów (SO₃),
 - wolny tlenek wapnia,
 - reaktywny tlenek wapnia;
- fizycznych:
 - uziarnienie,
 - stałość objętości,
 - zawartość wody,
 - aktywność pucolanowa,
 - aktywność hydrauliczna.

Wymienione właściwości (z wyjątkiem aktywności pucolanowej i hydraulicznej oraz zawartości wody) oznaczono według metod badawczych zawartych w normach dotyczących badań popiołów lotnych do betonu oraz badań cementu.

Określenie uziarnienia dla popiołu lotnego krzemionkowego wykonano zgodnie z normą PN-EN 451-2 z tą różnicą, że dodatkowo badano miąższość na sicie o boku oczka 90 μm . Wynik stanowił procent przesianej masy przez sito. Natomiast dla popiołu lotnego wapiennego uziarnienie określano zgodnie z normą PN-EN 196-6 z tą różnicą, że dodatkowo przesiewano przez sito o boku oczka 315 μm , a wynik stanowił procent przesianej masy.

Określenie aktywności hydraulicznej polegało na pomiarze zmiany wartości wytrzymałości na ściskanie w czasie, mieszaniny popiołu lotnego oraz piasku normowego. Badanie zostało przeprowadzone według normy PN-EN 196-1:2006. Belecзки z zaprawy zostały rozformowane po 48 h od zarobienia i pielęgnowane do momentu badania w wilgotnej atmosferze o wilgotności względnej co najmniej 90%.

Określenie aktywności pucolanowej polegało na pomiarze zmiany wartości wytrzymałości na ściskanie w czasie, mieszaniny wapna, popiołu lotnego oraz piasku normowego. Badanie zostało przeprowadzone według normy PN-EN 196-1:2006. Belecзки z zaprawy zostały rozformowane po 48 h od zarobienia i pielęgnowane do momentu badania w wilgotnej atmosferze o wilgotności względnej co najmniej 90%.

Badanie zawartości wody wykonano według procedury badawczej BC-1. Metoda polegała na oznaczeniu wagowym ubytku masy popiołu lotnego wskutek suszenia odważki w suszarce z wentylacją w temperaturze 105–110°C.

3.1. Charakterystyka wybranych popiołów lotnych

Do badań wybrano cztery próby popiołów lotnych:

- próbka nr 1 – popiół lotny wapienowy ze spalania węgla brunatnego w konwencjonalnym kotle na miął węglowy;
- próbka nr 2 – popiół lotny wapienowy ze spalania węgla brunatnego w kotle fluidalnym;
- próbka nr 3 – popiół lotny krzemionkowy ze spalania węgla kamiennego w kotle fluidalnym;
- próbka nr 4 – popiół lotny krzemionkowy ze spalania węgla kamiennego z biomasą w kotle konwencjonalnym.

Próbka nr 3, mimo że pochodzi z kotła fluidalnego i powinna być traktowana jako popiół wapienny, nie wykazuje cech popiołu wapiennego, została więc zbadana w takim zakresie jak popioły krzemionkowe.

3.2. Wyniki badań

T a b e l a 2

Właściwości fizykochemiczne popiołów lotnych krzemionkowych

Właściwość [% masy]	Popiół lotny krzemionkowy	
	próbka nr 3	próbka nr 4
Strata prażenia	3,46	3,77
Zawartość SO ₃	2,49	0,60
Zawartość wolnego CaO	0,05	0,21
Zawartość wody	0,47	0,50

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

T a b e l a 3

Właściwości fizykochemiczne popiołów lotnych wapiennych

Właściwość [% masy]	Popiół lotny wapienny	
	próbka nr 1	próbka nr 2
Stalność objętości	0,5	0,5
Zawartość reaktywnego CaO	18,81	10,35
Zawartość wody	0,98	0,18

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

T a b e l a 4

Skład ziarnowy popiołów lotnych wapiennych

Skład ziarnowy [% masy przechodzącej przez sito]		
Nr próbki	wynik badania	
Boki oczka sita	315 μm	90 μm
Próbka nr 1	98,5	79,0
Próbka nr 2	99,9	89,2

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

T a b e l a 5

Skład ziarnowy popiołów lotnych krzemionkowych

Skład ziarnowy [% masy przechodzącej przez sito]		
Nr próbki	wynik badania	
Bok oczka sita	90 μm	45 μm
Próbka nr 3	99,4	88,4
Próbka nr 4	87,2	72,1

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

T a b e l a 6

Wytrzymałość na ściskanie popiołów lotnych

Numer próbki	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			
	7 dni	28 dni	56 dni	90 dni
Próbka nr 1	1,7	0,6	0,4	0,6
Próbka nr 2	2,8	3,4	2,4	2,0
Próbka nr 3 (z dodatkiem 8% wapna)	6,0	4,0	3,6	3,3
Próbka nr 4 (z dodatkiem 8% wapna)	0,6	1,2	1,3	1,4

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

4. Podsumowanie

Klasyfikacja popiołów według PN-EN 14227-4 jest bardziej korzystna i umożliwia wykorzystanie szerszej gamy popiołów lotnych niż dotychczas. Norma obejmuje wszystkie rodzaje popiołów, bez względu na technologię spalania węgla i odsiarczania spalin, nawet te, które nie spełniają wymagań normy PN-S-96035 lub PN-EN 450-1 [3–5].

Popioły fluidalne niezależnie od rodzaju spalanego węgla zaliczone zostaną według nowej klasyfikacji do popiołów wapiennych.

Popioły wapienne i krzemionkowe spełniające normę PN-EN 14227-4 mogą być stosowane w mieszankach związanych hydraulicznie według PN-EN 14227-3.

Badania właściwości chemicznych popiołów lotnych wykazały, że mimo zróżnicowanego składu chemicznego wszystkie spełniają wymagania podane w normie PN-EN 14227-4. Badania właściwości fizycznych w zakresie oznaczenia stałości objętości, zawartości wody i składu ziarnowego wykazały, że wszystkie badane popioły lotne są zgodne z wymaganiami normy PN-EN 14227-4.

Badania aktywności pucolanowej i hydraulicznej świadczą o tym, że spośród analizowanych popiołów tylko w odniesieniu do popiołów lotnych, pochodzących ze współspalania węgla kamiennego i biomasy, występują przyrosty wytrzymałości na ściskanie w czasie. W pozostałych próbach, mimo dużych początkowych wartości wytrzymałości na ściskanie, następował ich spadek w późniejszych terminach badań.

Należy zaznaczyć, że nowa norma nie podaje jednoznacznie procedury badań rozwoju wytrzymałości, w tym w szczególności sposobu przechowywania próbek.

Literatura

- [1] Galos K., Eliasz-Bocheńczyk A., *Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce*, „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2005, t. 21, z. 1.
- [2] Szczygielski T., *Uboczne produkty spalania w drogownictwie. Normy a aprobaty techniczne*, „Autostrady” 2009, nr 10.
- [3] Wymagania techniczne WT-5 2010: Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych.
- [4] Norma PN-EN 14227-4:2005: Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Specyfikacja. Część 4: Popioły lotne do mieszanek.
- [5] Norma PN-S-96035:1997: Drogi samochodowe. Popioły lotne.
- [6] PN-EN 14227-14: 2006: Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacja. Część 14: Grunty stabilizowane popiołami lotnymi.

GRZEGORZ ROLKA
EWELINA ŚLĘZAK

FLY ASH FOR ROAD CONSTRUCTION IN THE LIGHT OF CURRENT STANDARD REQUIREMENTS

Keywords: calcareous fly ash, siliceous fly ash, hydraulically bound mixtures, mixtures with fly ash, physical and chemical properties.

The article concerns identification of physical and chemical properties of the national fly ashes originating from combustion of culm, lignite and co-burning of hard coal with biomass. The fly ashes were evaluated in intention to apply them as hydraulically bound mixtures for building roads, airport runways and other areas of communication in accordance with standard PN-EN 14227-4.

The purpose of the study was to recognize current binding standard regulations concerning materials for roads construction, especially focusing on new European standard EN 14227-4 which describes in particular the physical and chemical properties of fly ashes that could be used in the production of mixtures for road construction.