

# WALORYZACJA MECHANICZNA POPIOŁÓW LOTNYCH, JAKO EFEKTYWNA METODA OTRZYMYWANIA SPECJALISTYCZNYCH SUROWCÓW DLA PRZEMYSŁU BUDOWLANEGO

Paulina Nowak  
Łukasz Uruski  
Daniel Nabagło  
PGE Energia Ciepła S.A.

Sebastian Franaszczuk  
PGE Ekoserwis Sp. z o.o.

## STRESZCZENIE

---

*Waloryzacja mechaniczna popiołów jest jedną z dojrzałych technologii, która umożliwia efektywne kształtowanie parametrów jakościowych popiołów lotnych. Dotychczas jakość popiołów w Polsce oraz zapotrzebowanie na rynku lokalnym i zagranicznym na ten surowiec było na tyle zbilansowane, że technologie waloryzacji nie były stosowane. Mając na uwadze ich potencjał Departament Badań i Rozwoju PGE Energia Ciepła S.A. oraz PGE Ekoserwis Sp. z o.o. przeprowadzili badania mające na celu optymalizację jakości ubocznych produktów spalania. Podejmowane działania były skoncentrowane na trzech głównych aspektach:*

- *poszerzeniu wiedzy na temat wpływu pracy kotłów energetycznych na jakość popiołu lotnego,*
- *ograniczeniu negatywnych skutków pracy instalacji oczyszczania spalin na jakość popiołu lotnego,*
- *zbadaniu możliwości waloryzacji popiołu lotnego.*

*W oparciu o otrzymane wyniki, przeprowadzono rozszerzone testy obiektowe, których celem była ocena:*

- *stabilizacji otrzymywanego produktu bazowego – popiołu lotnego kategorii miałkości N – niezależnie od parametrów nadawy,*
- *wpływu parametrów nadawy oraz parametrów prowadzenia procesu waloryzacji na produkty wysokojakościowe – popiół lotny kategorii miałkości S oraz premium S,*

- *możliwości wdrożenia polityki Circular Economy, czyli zamknięcia cyklu produkcyjnego i znalezienia zastosowania dla maksymalnej ilości frakcji odpadów powstałych w procesie separacji.*

*Podjęte działania pozwoliły kompleksowo ocenić potencjał wykorzystywania technologii waloryzacji mechanicznej w skali przemysłowej, określić parametry użytkowe wszystkich otrzymywanych frakcji popiołowych oraz ich potencjalne kierunki zbytu i zastosowania.*

---

## 1. WSTĘP

Popioły lotne pochodzące ze spalania węgla kamiennego, dzięki swoim właściwościom fizykochemicznym takim jak: kulisty kształt ziaren, miałkość, aktywność pucolanowa; znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle. Największy wolumen wykorzystywany jest w przemyśle budowlanym do produkcji cementów, betonów, kruszyw, w drogownictwie, górnictwie czy rekultywacji terenów, a w mniejszej ilości do produkcji materiałów ceramicznych [1]. Popiół lotny jest cennym dodatkiem w budownictwie i produkcji betonu, ze względu na wpływ między innymi na [2, 3, 4, 5, 6]:

- zmniejszenie ilości wody zarobowej w mieszance betonowej,
- obniżenie ilości stosowanego cementu,
- obniżenie wodożądności i porowatości kapilarnej,
- zwiększenie urabialności betonu,
- zwiększenie długoterminowej wytrzymałości betonu,
- obniżenie porowatości i przepuszczalności,
- obniżenie wrażliwości na procesy korozyjne.

Im mniejsze rozmiary ziaren popiołu lotnego użytego do produkcji betonu tym intensywniejszy pozytywny wpływ na parametry użytkowe.

Ze względu na intensywny rozwój, sektor budowlany charakteryzuje się stale zaostrzonymi regulacjami prawnymi dotyczącymi wymagań jakościowych używanych półproduktów. Przykładem może być Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa w sprawie sposobu deklarowania właściwości użytkowych wyrobów budowlanych oraz sposobu znakowania ich znakiem budowlanym, w wyniku którego beton towarowy zostanie uznany za wyrób budowlany i będzie podlegał krajowemu systemowi oceny i weryfikacji stałości właściwości użytkowych. Bezpośrednią konsekwencją zachodzących zmian, będzie konieczność stosowania do produkcji betonu wyłącznie produktów certyfikowanych. W przypadku popiołu lotnego oznacza to możliwość wykorzystania materiału o stratach prażenia nie więcej niż 5% masy (kategoria A), nie więcej niż 7% masy (kategoria B), nie więcej niż 9% masy (kategoria C) oraz miałkości poniżej 40% (kategoria N). Implementowane w ostatnich latach oraz planowane do wprowadzenia w niedalekiej przyszłości regulacje prawne dotyczące redukcji emisji zanieczyszczeń w sektorze energetycznym mogą spowodować problemy z dotrzymaniem wymagań

jakościowych, w szczególności w przypadku starszych jednostek produkcyjnych. Konieczność ograniczenia emisji tlenków siarki i przede wszystkim tlenków azotu nie pozostaje bez wpływu na jakość popiołu. Stosowanie metod pierwotnych oraz selektywnej niekatalitycznej redukcji (SNCR) tlenków azotu skutkuje wzrostem strat prażenia popiołu oraz jego wyższą mialkością. W efekcie zmian zachodzących w procesach: produkcji oraz zarządzania strumieniem UPS może wystąpić postępujące zwiększanie wolumenu produktu nie spełniającego wymagań normowych, będącego w dyspozycji producentów energii elektrycznej i ciepła. Materiał niespełniający wymagań jakościowych i nienadający się do zastosowania w tradycyjnych kierunkach, deponowany jest na składowiskach ziemnych lub w mokrych osadnikach, co pociąga za sobą znaczne koszty dla wytwórców, jak również stanowi obciążenie dla środowiska. W ramach prowadzonych działań, mających na celu zwiększenie wolumenu zagospodarowanego popiołu lotnego powstającego w PGE Energia Ciepła S.A. (PGE EC) oraz polepszenie konkurencyjności produktów będących w portfolio Managera UPS, firmy PGE Ekoserwis Sp. z o.o., podjęto prace mające na celu optymalizację mialkości popiołu lotnego oraz umożliwienie okresowego otrzymywania produktu o wysokiej mialkości oraz polepszonych właściwościach użytkowych.

## 2. OCENA JAKOŚCI POPIOŁÓW LOTNYCH

W artykule stosowane są skróty określające poszczególne kategorie jakościowe popiołów lotnych, zgodne z zapisami normy PN-EN 450-01:2012 „Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności” [7]. W poniższej tabeli (Tabela 1) przedstawiono najczęściej stosowane oznaczenia:

**Tabela 1.** Kategorie popiołów lotnych zgodnie z PN-EN 450-01:2012

Kategoria popiołu lotnego wg PN-EN 450-01:2012	Parametr kontrolowany
N	Mialkość [%] $\leq 40$
S	Mialkość [%] $\leq 12$
A	LOI [%] $< 5$
B	LOI [%] 2-7
C	LOI [%] 4-9

Przystępując do realizacji projektu, jako pierwsze zadanie przeprowadzono inwentaryzację popiołów lotnych w spółkach produkcyjnych PGE EC. Głównym celem prowadzonych prac było określenie parametrów fizykochemicznych popiołu lotnego w zależności od miejsca poboru próbki, konstrukcji kotła, jakości spalanego paliwa, obciążenia, zainstalowanych systemów oczyszczania spalin oraz weryfikacja zasadności selektywnego odbioru popiołu lotnego z konkretnego miejsca, w którym stwierdzono największy udział frakcji o pożądanych parametrach. Wykonano pobory prób popiołu lotnego z kilku kotłów (typu OP-650

oraz OP-380) opalanych węglem kamiennym oraz mieszkanką węgla kamiennego z biomasą z różnych nitek kanałów spalin i stref elektrofiltru. Łącznie w ramach prac analizie poddano ponad 900 próbek popiołu lotnego. Wyniki inwentaryzacji zostały szczegółowo zaprezentowane w publikacji zamieszczonej w opracowaniu z XXIII Międzynarodowej Konferencji Popioły z Energetyki 2016 [8], poniżej przedstawiono najważniejsze wnioski:

- Miałkość (ułamek masowy w procentach wyrażony jako pozostałość na sicie o boku oczka wynoszącym 45 $\mu$ m) popiołu lotnego spada wraz z kolejną strefą elektrofiltru (strefa EF). Największa jest dla materiału z pierwszej strefy, a najmniejsza z trzeciej, jednakże nie jest możliwe jednoznaczne skategoryzowanie popiołu z poszczególnych stref EF.
- Zidentyfikowano wysoką niestabilność parametrów jakościowych (uziarnienie, zawartość części palnych) popiołu lotnego z poszczególnych strefach EF w czasie.
- Miałkość oraz zawartość części palnych (LOI – loss of ignition) w popiele lotnym jest silnie związana z pracą zespołów młynowych, sposobem prowadzenia procesu spalania oraz działaniem metod pierwotnych.
- Dla przebadanych w inwentaryzacji próbek popiołu, materiał pochodzący z kolejnych stref elektrofiltru, można scharakteryzować pod kątem miałkości jak w poniższej tabeli (Tabela 2).

**Tabela 2.** Charakterystyka popiołu lotnego w kolejnych strefach elektrofiltru.

	OP-650	OP-380
<b>Strefa I</b>	Miałkość - kategoria N, okresowo materiał poza normowy	
	LOI - kategoria A	LOI - kategoria B dla większości próbek
<b>Strefa II</b>	Miałkość – kategoria N, okresowo S LOI - kategoria B, okresowo A	Zazwyczaj kategoria S (75% próbek)
<b>Strefa III</b>	Miałkość – kategoria S, LOI – kategoria A	

- Wraz z uruchomieniem większej ilości instalacji odazotowania spalin metodami pierwotnymi (przede wszystkich z wykorzystaniem palników niskoemisyjnych) zauważono ogólny wzrost zawartości części palnych, a także przekroczenia limitu dla kategorii A w materiale z trzeciej strefy elektrofiltru.
- Wykazano, iż ze względu na bardzo dużą zmienność jakości popiołu lotnego w czasie, selektywny odbiór popiołu niesie za sobą ryzyko uzyskiwania 100% nienormowego wypadu.

Przeprowadzona inwentaryzacja popiołów lotnych pozwoliła wykluczyć selektywny odbiór materiału ze stref jako uzasadnioną metodę uzyskiwania materiału o niskiej miałkości. Popiół kategorii S możliwy byłby do uzyskania jedynie poprzez

selektywny odbiór materiału z II oraz III strefy elektrofiltru, co stanowi zaledwie około 20% całościowego wypadu. Dodatkowo wymagałby on skomplikowanego i bardzo czułego systemu kontroli jakości (miałkość, LOI) pozwalającego na detekcję materiału, który okresowo nie mieści się jakościowo w granicach norm. Należy również wspomnieć, iż zubożenie całkowitego strumienia popiołu o najbardziej miłąkłą frakcję, o wysokiej jakości, może powodować powstawanie bardzo dużego wolumenu materiału nienormowego (wypad z I strefy stanowi około 80% całego strumienia). Bazując na pozyskanej wiedzy podjęto decyzję o kontynuacji działań mających na celu rozpoznanie możliwości wykorzystania technologii mechanicznej waloryzacji popiołu lotnego.

### 3. WALORYZACJA POPIOŁU LOTNEGO

Za najbardziej obiecującą metodę waloryzacji popiołu, uznano klasyfikację opartą na rozdziale materiału pod kątem wielkości ziarna. Testy separacji w skali półtechnicznej, przeprowadzono dwuetapowo, w sumie u 6 komercyjnych dostawców technologii. Po pierwszym etapie nastąpiła selekcja najkorzystniejszych, pod względem technologicznym i ekonomicznym rozwiązań. Testy obiektowe miały na celu:

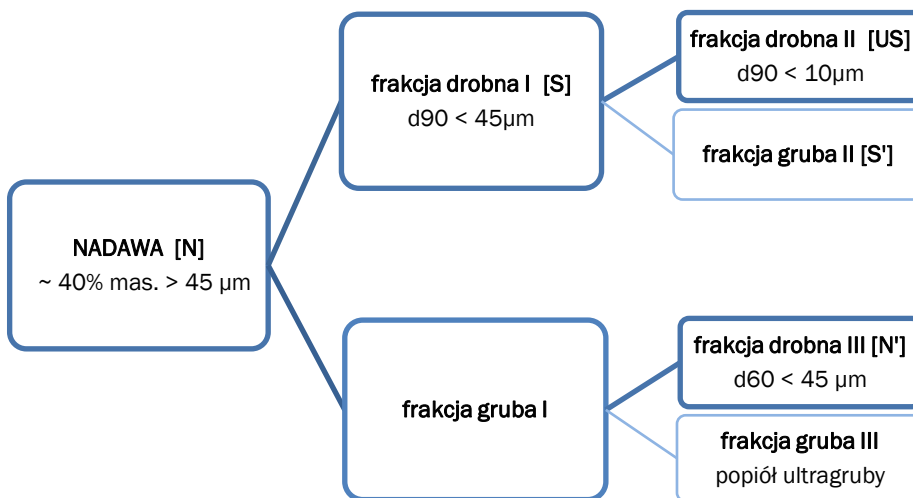
- Zbadanie różnych typów separatorów, ocenę przydatności technologii dla posiadanych aktywów.
- Analizę parametrów technicznych dostępnych urządzeń, wybór najlepszego rozwiązania.
- Ocenę możliwości sterowania parametrami uzyskiwanego materiału w zależności od aktualnych potrzeb.
- Analizę fizykochemiczną otrzymanych w wyniku waloryzacji materiałów.
- Analizę polskiego rynku popiołów lotnych pod kątem popytu na materiały o obniżonej miałkości.
- Analizę ekonomiczną przetestowanych rozwiązań, celem wyboru najbardziej opłacalnego wariantu.
- Ocenę wpływu jakości nadawy na parametry użytkowe uzyskiwanego materiału.
- Pozyskanie większej partii materiału o zadanych parametrach celem możliwości przekazania ich do partnerów biznesowych do oceny ich przydatności jako dodatku do betonu.
- Identyfikację potencjalnych ryzyk wynikających ze stosowania waloryzacji mechanicznej.

Badania przeprowadzono na popiele lotnym pobranym ze zbiorników retencyjnych w czterech lokalizacjach produkcyjnych. W poniższej tabeli (Tabela 3) znajduje się podsumowanie parametrów użytego w trakcie testów materiału.

**Tabela 3.** Parametry fizyko-chemiczne popiołu lotnego do testów.

	Miałość [%]	LOI [%]	TOC [%]	D10 [ $\mu\text{m}$ ]	D50 [ $\mu\text{m}$ ]	D90 [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Wartość średnia</b>	38,04 $\pm$ 6,72	4,42 $\pm$ 0,82	4,09 $\pm$ 0,82	6,02 $\pm$ 1,54	57,63 $\pm$ 16,63	176,75 $\pm$ 53,63

Celem nadrzędnym było przeprowadzenie waloryzacji tak, aby możliwe było maksymalne wykorzystanie wszystkich uzyskiwanych frakcji w myśl gospodarki o obiegu zamkniętym. Aby porównywać wyniki uzyskiwane na różnych urządzeniach przy odmiennych nadawach wszystkim dostawcom wyznaczono zadane parametry materiałów pożądaných na poszczególnych etapach waloryzacji. Schemat postępowania oraz parametry pożądanę dla poszczególnych frakcji zaprezentowano na poniższym rysunku (Rysunek 1).

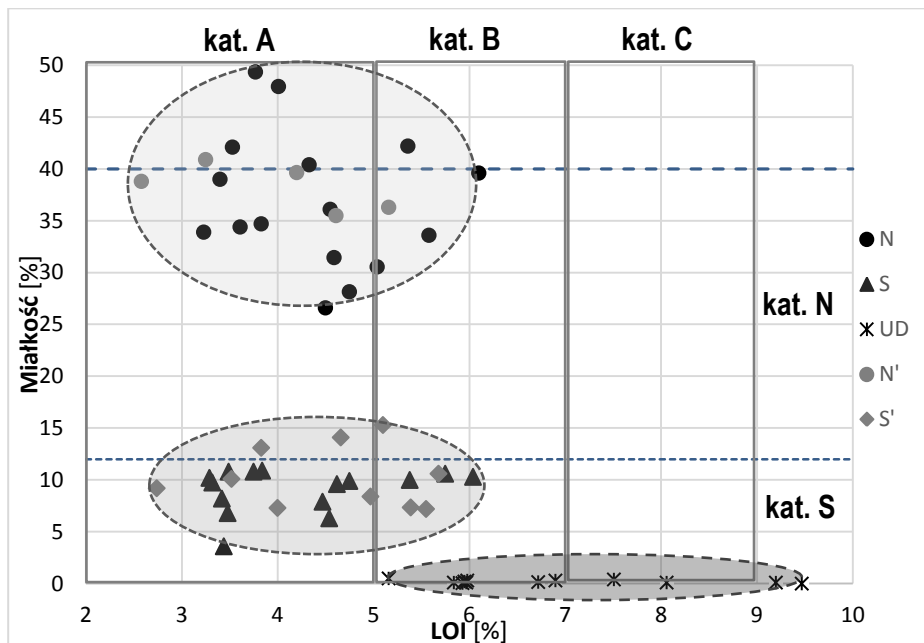
**Rysunek 1.** Schemat testów oraz zakładane parametry poszczególnych frakcji

Dla wszystkich uzyskanych próbek, akredytowane laboratorium zewnętrzne wykonało podstawowe analizy fizykochemiczne:

- miłość,
- straty prażenia (LOI),
- analizę granulometryczną (rozkład ziarnowy).

Na podstawie wyników powyższych testów z każdej z uzyskanych frakcji wyselekcjonowano próbki, które poddano dodatkowym analizom zgodnie z zakresem normy PN-EN 450-1:2012 „Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności”.

Wpływ procesu separacji na zmianę miąłkości i strat prażenia (LOI) przedstawiono na poniższym wykresie (Rysunek 2). Uwzględnia on podział na kategorie ze względu na wartość strat prażenia (A, B i C) oraz miąłkość (S i N).



**Rysunek 2.** Wartość miąłkości i strat prażenia (LOI) dla poszczególnych frakcji.

W wyniku przeprowadzonych testów waloryzacji mechanicznej z materiału wyjściowego [N], kwalifikującego się pod kątem miąłkości do kategorii N lub będącego produktem nienormowym, uzyskano następujące materiały:

- Frakcję drobną I [S] o miąłkości spełniającej wymagania kategorii S oraz LOI na poziomie porównywalnym do nadawy. Sprawność procesu w granicach 50-75% uzależniona od zastosowanego urządzenia oraz jego nastaw.
- Odpowiednie nastawy urządzeń pozwoliły uzyskać popiół lotny o miąłkości poniżej 12% niezależnie od parametrów jakościowych nadaw.
- Materiał ultradrobny [UD], pozyskany w wyniku ponownej klasyfikacji frakcji S. Charakteryzuje się on miąłkością na poziomie poniżej 1%, obserwowano jednak podwyższenie zawartości części palnych względem nadawy. Sprawność procesu, liczona względem masy frakcji S, kształtowała się na poziomie 10-35% w zależności od typu zastosowanego urządzenia oraz jego nastaw.

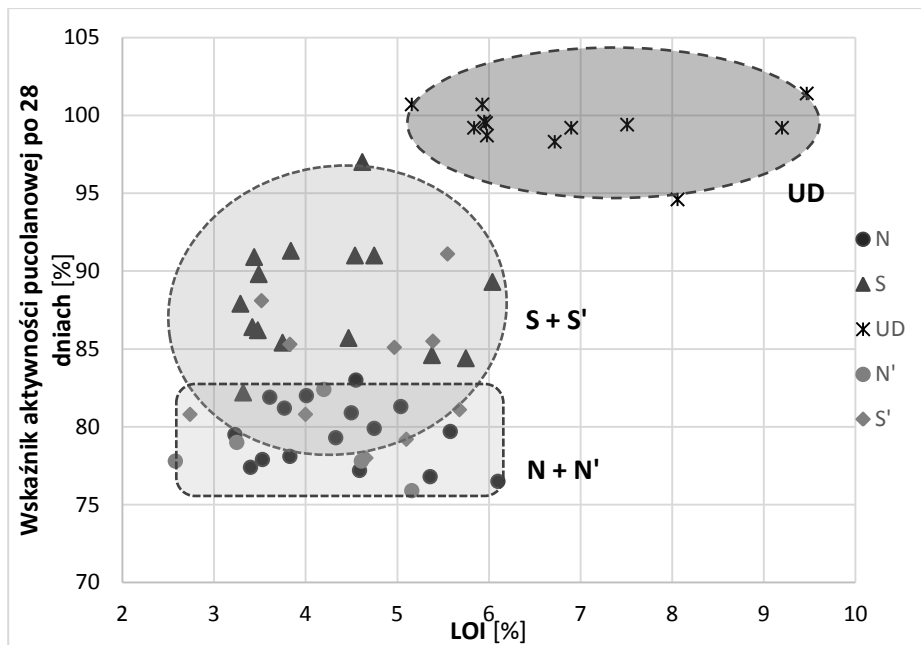
- Frakcję odpadową w procesie tworzenia popiołu ultradrobno [S'], która miałością odpowiada popiołowi kategorii S, a LOI kształtuje się na poziomie nadawy.
- Frakcję drobną [N'] uzyskaną w procesie reklasyfikacji, którą scharakteryzować można pod kątem miałości, jako popiół lotny kategorii N.
- Frakcję ultragrubą uzyskaną w procesie reklasyfikacji, która ze względu na podobieństwo w strukturze ziarnowej do piasku bez problemu znajdzie zastosowanie w obecnie stosowanych kierunkach.

Pod kątem wartości strat prażenia obserwowany jest wzrost procentowej wartości LOI wraz ze spadkiem miałości materiału, osiągający dla frakcji ultradrobnej wartość 5-10%. Zjawisko to zidentyfikowane zostało jako jedno z ryzyk prowadzenia procesu waloryzacji mechanicznej. Konieczne jest kontynuowanie prac nad możliwością usunięcia niespalonego węgla z popiołu, należy jednak podkreślić, iż literatura wskazuje, że stosowanie do betonu popiołów o wysokich stratach prażenia, tzn. przekraczających 5%, nie musi wpływać negatywnie na ich właściwości. Wyniki badań wytrzymałościowych wykonanych dla betonów z dodatkiem popiołów lotnych o różnym wskaźniku strat prażenia wskazują, że zawartość rezydualnego węgla w popiele, nie wpływa niekorzystnie na mikrostrukturę oraz na rozwój mechanicznej wytrzymałości materiału, nawet przy wysokiej zawartości węgla wynoszącej 9 i 12%. Warunek, który powinien być spełniony, to właściwy nadzór technologiczny nad produkcją betonu, oparty na bieżącym oznaczaniu właściwości popiołów oraz odpowiednich korektach jego składu [3].

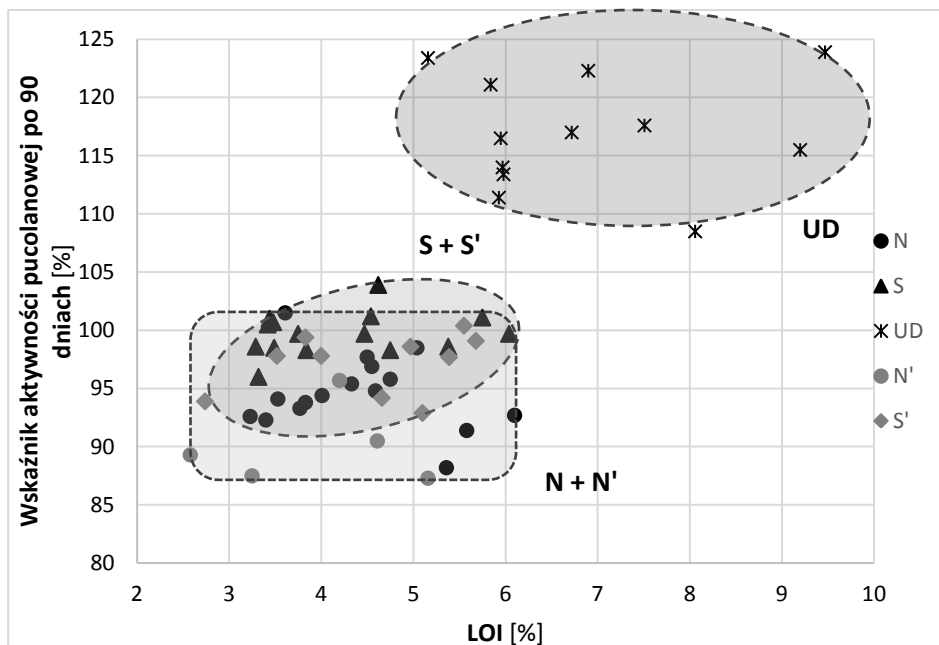
#### 4. OCENA WŁAŚCIWOŚCI UZYSKIWANYCH MATERIAŁÓW

Norma PN-EN 450-1:2012 [1] określa wiele wymagań jakościowych odnoszących się do popiołu lotnego stosowanego jako dodatek typu II (dodatek o właściwościach pucolanowych lub utajonych właściwościach hydraulicznych) do betonu. Analizując wpływ przeprowadzonej waloryzacji na właściwości frakcji popiołowych, w pierwszej kolejności ocenie poddano wartości wskaźników aktywności pucolanowej zapraw wykonanych z wykorzystaniem poszczególnych frakcji popiołowych. W przeprowadzonych badaniach wskaźniki aktywności pucolanowej porównywano względem tego samego rodzaju komercyjnego cementu typu CEM I. Zgodnie ze stanem wiedzy oczekiwano, że już pierwszy etap waloryzacji prowadzący do uzyskania materiału o miałości kategorii S, polepszy parametry wytrzymałościowe zapraw względem nadawy, a zastosowanie materiału klasy ultradrobnej poprawi ten efekt. Niewiadomą było natomiast jak kolejne etapy reklasyfikacji wpłyną na właściwości użytkowe odzyskiwanych materiałów. Zestawienie uzyskanych wyników przedstawiono na poniższych wykresach (Rysunek 3, Rysunek 4).





Rysunek 3. Zależność pomiędzy K28 i LOI dla wydzielonych frakcji

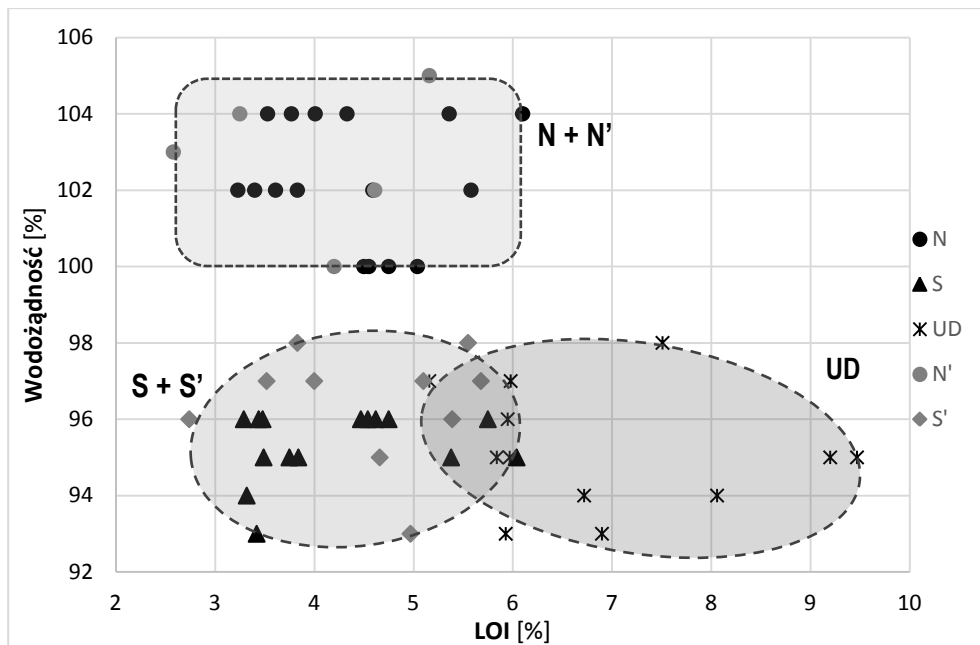


Rysunek 4. Zależność pomiędzy K90 i LOI dla wydzielonych frakcji

Przeprowadzone analizy potwierdziły pierwotne oczekiwania. Popiół lotny o mianości kategorii S uzyskany w wyniku I etapu waloryzacji zarówno po 28 jak i 90 dniach pozwalał uzyskiwać polepszone parametry wytrzymałościowe względem nadaw. Podsumowując parametry użytkowe wszystkich uzyskanych frakcji:

- Uzyskane popioły lotne o mianości kategorii S [frakcje S, S'] odznaczają się przyspieszonym względem nadawy przyrostem wytrzymałości w początkowym okresie wiązania [K28], osiągając dla niektórych próbek wartości zbliżone do cementu porównawczego. Świadczy to o przyspieszeniu reakcji pucolanowej w wyniku zastosowania popiołu o obniżonej średnicy ziaren.
- Po dłuższym okresie wiązania, niektóre z zapraw wykonanych z zastosowaniem popiołów o mianości kategorii S, charakteryzowały się wytrzymałością wyższą niż w przypadku zastosowania cementu CEM I.
- Zaprawy wykonane z zastosowaniem frakcji ultradrobnych [UD] zdecydowanie odstają swoimi parametrami wytrzymałościowymi od pozostałych materiałów. Charakteryzuje się ona bardzo wysokimi wartościami aktywności pucolanowej zarówno w porównaniu do nadawy jak i frakcji odpowiadającej popiołowi kategorii S.
- Wszystkie uzyskane z użyciem frakcji UD zaprawy, charakteryzowały się w początkowym okresie wiązania, wytrzymałością porównywalną do cementu portlandzkiego oraz wytrzymałością długoterminową przekraczającą parametry odniesienia o 10-23%.
- Bardzo wysokie wartości aktywności pucolanowej frakcji UD obserwowane są, niezależnie od zawartości strat prażenia. Próbki o LOI wynoszącym 6% charakteryzują się w niektórych przypadkach wskaźnikiem K90 niższym niż próbki o LOI przekraczającym 9%. LOI nie jest więc w tym przypadku czynnikiem limitującym, co potwierdza dane literaturowe.
- Zaprawy uzyskane z wykorzystaniem frakcji popiołowych S' oraz N', nie odstają w sposób znaczący pod kątem wytrzymałości od pozostałych materiałów tej samej klasy.
- Wszystkie analizowane frakcje spełniają warunki normowe w zakresie aktywności pucolanowej.

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki zmienności wartości LOI w poszczególnych frakcjach popiołowych analizie poddano parametr związany z wodożądnością uzyskiwanych zapraw. Literatura wskazuje, iż znaczny wzrost wartości LOI powyżej wartości normowej 5%, powinien skutkować podwyższeniem wodożądności i pogorszeniem parametrów użytkowych popiołu lotnego. Wyniki uzyskane dla poszczególnych frakcji przedstawiono na poniższym wykresie (Rysunek 5).



**Rysunek 5.** Zależność pomiędzy wodoządnością i LOI dla wydzielonych frakcji

W oparciu o powyższy wykres (Rysunek 5) zauważyć można, iż zastosowany proces waloryzacji mechanicznej spowodował obniżenie wodoządnosci zapraw uzyskiwanych z wykorzystaniem popiołu kategorii S oraz ultradrobnoego względem nadawy, pomimo zwiększonej wartości LOI. Pewna populacja próbek z materiałami kategorii S oraz ultradrobnoymi, charakteryzuje się wartością wodoządnosci powyżej 97% czyli przekracza normowy warunek stawiany popiołom kategorii S.

## 5. PODSUMOWANIE PRAC

Przeprowadzone testy waloryzacji mechanicznej popiołu lotnego pozwoliły odpowiedzieć na wszystkie postawione pytania. Wykazały, że klasyfikacja popiołu lotnego pozwala na uzyskiwanie materiału o stabilnej i zadanej jakości oraz, że może zostać wykorzystana zarówno jako metoda stabilizacji jakości popiołu w jednostkach produkcyjnych, jak i technologia do pozyskiwania dodatków do wyspecjalizowanych materiałów budowlanych. Odpowiednie planowanie procesu waloryzacji pozwala na zagospodarowanie wszystkich uzyskiwanych frakcji, co w ostatecznym rozrachunku może doprowadzić do ograniczenia ilości składowanego popiołu lotnego.

Biorąc pod uwagę uwarunkowania rynkowe i możliwości wykorzystania poszczególnych frakcji popiołowych wyróżnić należy następujące potencjalne kierunki zastosowań:

- Popiół lotny o mianości kategorii N – jako dodatek typu II do produkcji betonu, zapraw i zaczynów oraz pozostałych typowych zastosowań.
- Popiół o mianości kategorii S – najwyższym potencjałem stosowania tego materiału cechuje się branża prefabrykatów betonowych, może on również znaleźć zastosowanie w chemii budowlanej, produkcji betonu specjalnego i ceramice budowlanej.
- Ultradrobną frakcją popiołową może zostać wykorzystana przede wszystkim w produktach specjalistycznych w branży cementowo-betoniarskiej oraz ceramice budowlanej.
- Najgrubsza frakcja popiołowa (produkt uboczny w procesie separacji) – zastosowanie analogiczne do mieszanki popiołowo-żużlowej (np. produkty dedykowane do inżynierii lądowej).

Rozwój przemysłu budowlanego oraz poziom skomplikowania powstających konstrukcji betonowych wymuszać będzie ciągły postęp w wytwarzaniu betonów specjalnych.

## 6. SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 1. Schemat testów oraz zakładane parametry poszczególnych frakcji

Rysunek 2. Wartość mianości i strat prażenia (LOI) dla poszczególnych frakcji.

Rysunek 3. Zależność pomiędzy K28 i LOI dla wydzielonych frakcji.

Rysunek 4. Zależność pomiędzy K90 i LOI dla wydzielonych frakcji.

Rysunek 5. Zależność pomiędzy wodozadržnością i LOI dla wydzielonych frakcji.

## 7. SPIS TABEL

Tabela 1. Kategorie popiołów lotnych zgodnie z PN-EN 450-01:2012

Tabela 2. Charakterystyka popiołu lotnego w kolejnych strefach elektrofiltru.

Tabela 3. Parametry fizyko-chemiczne popiołu lotnego do testów.

## 8. LITERATURA

- [1] J.J. Hycnar, Ekonomiczne aspekty gospodarki ubocznymi produktami spalania węgla (UPS). *Energetyka*, 5/2013, 399–402.
- [2] *Vademecum technologia betonu – Górażdże Heidelberg Cement Group, Chorula 2016.*
- [3] G.L. Golewski, Procesy pęknięcia w betonie z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych, *Monografie Politechniki Lubelskiej, Lublin 2015.*
- [4] Z. Giergiczny, Właściwości popiołu lotnego a trwałość betonu, *Technologie, Lipiec-Wrzesień 2007.*
- [5] Z. Giergiczny, Popiół lotny składnikiem betonu – normalizacja I praktyka, *Technologie, Styczeń-Marzec 2009.*
- [6] Z. Giergiczny, M. Gawlicki, Popiół lotny do betonu – nowelizacja normy PN-EN 450, *Technologie, Lipiec-Wrzesień 2005.*
- [7] PN-EN 450-01:2012, Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
- [8] K. Witkowski, P. Nowak, T. Hyla, Nowe produkty na bazie popiołów lotnych. Szanse i ograniczenia, *XXIII Międzynarodowa Konferencja Popioły z energetyki, 2016, 159-181.*

## **FLY ASH MECHANICAL VALORIZATION AS EFFECTIVE METHOD OF OBTAINING SPECIALIST MATERIALS FOR CONSTRUCTION INDUSTRY**

### **ABSTRACT**

---

*Fly ash mechanical valorization is one of technologies which allow to shape the properties of raw material in very effective way. Until now, the quality of fly ash in Poland, as well as the demand on local and international market were stable thus the valorization technologies were not in use. Considering the technologies potential Department of Research and Development in PGE Energia Ciepła S.A. in cooperation with PGE Ekoserwis Sp. z o.o. conducted tests and experiments in order to optimize the quality of fly ash. Primary works concentrated on three main aspects:*

- *expanding knowledge on the impact of power boilers operation on the fly ash quality,*
- *limiting the negative impact of flue gas cleaning installation on quality of combustion by-products,*
- *examination of different valorization techniques.*

*Based on the results, extended object tests were carried out, with the aim to assess:*

- *stability of obtained product regardless of feed quality parameters,*
- *impact of feed parameters and the parameters of valorization process on quality of high value products – fly ash class S and premium S,*
- *the possibilities of implementing the Circular Economy policy with finding application for the maximum amount of waste fractions created in the valorization process.*

*Conducted works allowed to comprehensively access the potential of using valorization technologies in industrial scale, determine the optimal parameters of all obtained fly ash fractions and potential directions of their applications.*

---