

Franciszek PLEWA\*, Marcin POPCZYK\*\*

## Badanie parametrów reologicznych hydromieszanin wytwarzanych na bazie odpadów energetycznych

**STRESZCZENIE.** Polskie kopalnie węgla kamiennego od lat prowadzi wykorzystanie w formie odzysku popiołów lotnych pochodzących z energetyki w postaci mieszanin popiołowo-wodnych w podziemnych technologiach górniczych. Znajomość własności fizycznych i reologicznych tych hydromieszanin jest niezbędna przy wyznaczaniu objętościowego natężenia przepływu w grawitacyjnych instalacjach transportowych (powszechnie stosowanych na kopalniach). W artykule przedstawiono wyniki badań podstawowych własności fizycznych oraz własności reologicznych hydromieszanin popiołowo-wodnych o różnej koncentracji części stałych. Biorąc pod uwagę różne obecnie stosowane w polskiej energetyce metody odsiarczania – co skutkuje powstawaniem popiołów lotnych o różnych własnościach fizycznych i chemicznych – w badaniach wykorzystano popioły lotne z trzech różnych polskich zakładów energetycznych i różnych metod odsiarczania. Popioły z kotłów fluidalnych, popioły z produktami półsuchego odsiarczania spalin oraz popiół bez odsiarczania.

**SŁOWA KLUCZOWE:** gospodarka odpadami, popioły lotne, hydrotransport

### Wprowadzenie

Odzysk drobnoziarnistych odpadów przemysłowych takich jak popioły lotne to działanie mające na celu ograniczenie ilości odpadów deponowanych na składowiskach przez ich wykorzystanie w podziemnych technologiach górniczych. Dodatkowo należy podkreślić, że

---

\* Prof. dr hab. inż., \*\* Dr inż. – Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice.

stosowanie popiołów lotnych w kopalniach węgla kamiennego w postaci hydromieszaniny pozwala ograniczyć zagrożenie pożarowe wywoływane samozapalnością węgla, wpływa na poprawę warunków wentylacyjnych, a także może służyć jako materiał wypełniający zbędne wyrobiska i pustki podziemne. Stosowanie mieszaniny popiołowo-wodnych w podziemiu kopalń uwarunkowane jest spełnieniem określonych wymagań prawnych, z których do ważniejszych można zaliczyć:

- ✧ Ustawa z dnia 4 lutego 1994 r. – Prawo Geologiczne i Górnicze (Dz.U. nr 27, poz. 96, z późniejszymi zmianami);
- ✧ Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Dz.U. nr 62, poz. 628, z późniejszymi zmianami);
- ✧ Rozporządzenie Ministra Środowiska dotyczące odzysku odpadów (R14 i R15) poza instalacjami i urządzeniami (Dz.U. nr 49, poz.356 z 2006r), oraz wymagań normowych zgodnie z PN-G-11011.

Polskie kopalnie węgla kamiennego do transportu mieszanin popiołowo-wodnych stosują instalacje hydrotransportu grawitacyjnego, które w zasadzie nie różnią się od wcześniej powszechnie używanych sieci rurociągów podsadzki hydraulicznej. Czynnikiem limitującym zastosowanie hydrotransportu grawitacyjnego jest ograniczony zasięg przepływu, czyli odległość od szybu lub otworu wiertniczego, w którym zabudowany jest rurociąg do wylotu z rurociągu w miejscu przeznaczenia. Odległość ta dla konkretnego miejsca przeznaczenia jest stała i zależy od parametrów instalacji (głębokość, długość, nachylenie poszczególnych odcinków rurociągu. Oprócz tego na objętościowe natężenie przepływu ma również wpływ średnica rurociągu, rodzaj materiału rur transportowych oraz parametry reologiczne hydromieszaniny zmieniające się w zależności od rodzaju popiołu lotnego oraz jego koncentracji w mieszaninie [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

## 1. Wyniki badań własności reologicznych oraz fizycznych mieszanin popiołowo-wodnych

Jak wspomniano wcześniej, decydujący wpływ na parametry hydrotransportu grawitacyjnego mieszanin cieczy i ciał stałych mają: rodzaj użytego do wytworzenia mieszaniny materiału i koncentracja części stałych w mieszaninie. Popioły lotne charakteryzują się różnymi i zmiennymi własnościami fizycznymi i chemicznymi, zależnymi od rodzaju i jakości węgla oraz stosowanych metod spalania i odsiarczania spalin w elektrowni. Nie tylko lepkość i gęstość mieszaniny, ale i inne parametry fizyczne i chemiczne zależą od koncentracji i rodzaju fazy stałej w mieszaninie. Dodatkowo stosując zasolone i zanieczyszczone wody kopalniane do wytwarzania mieszanin drobnofrakcyjnych należy się liczyć z podwyższoną gęstością i zmienionymi parametrami reologicznymi mieszaniny w porównaniu z mieszaninami z udziałem „czystej wody”. Do badań własności fizycznych mieszanin drobnofrakcyjnych wykorzystano cztery rodzaje popiołów lotnych:

- ✧ popiół lotny ze spalania węgla kamiennego w Elektrowni „S” z kotła fluidalnego, oznaczenie **F-S**,
- ✧ popiół lotny ze spalania węgla kamiennego w Elektrowni „S” bez odsiarczania spalin, oznaczenie **B-S**,
- ✧ popiół lotny ze spalania węgla kamiennego w Elektrowni „J” z kotła fluidalnego, oznaczenie **F-J**,
- ✧ popiół lotny ze spalania węgla kamiennego w Elektrowni „J” bez odsiarczania spalin, oznaczenie **B-J**,
- ✧ popiół z produktami pól suchego odsiarczania z Elektrowni „R” oznaczenie **P-R**.

Z uwagi na fakt powszechnego stosowania w polskich kopalniach wody kopalnianej do sporządzenia hydromieszanin, w warunkach laboratoryjnych również zastosowano zasoloną wodę kopalnianą o gęstości  $1020\text{kg/m}^3$ .

Dla oceny wpływu koncentracji części stałych w mieszaninie na jej własności reologiczne z każdego rodzaju popiołu lotnego sporządzono cztery mieszaniny o różnym udziale części stałych w wodzie, przy czym udział masowy popiołów był tak dobierany, aby uzyskać dla każdego z nich mieszaniny o stałych wartościach rozlewności równych 160, 200, 240 i 280 mm.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe własności fizyczne badanych mieszanin popiołowo-wodnych sporządzonych na bazie wody zasolonej oraz wartości parametrów reologicznych występujących w modelu Binghama, który standardowo jest wykorzystywany do modelowania między innymi przepływu mieszanin betonowych, zaczynów cementowych i innych mieszanin drobnoziarnistych wykazujących aktywność pucolanową.

W literaturze można spotkać również inne modele reologiczne [13] które według autorów można stosować do transportu mieszanin popiołowo-wodnych np. model Casona. Jednak brak jest przykładu obliczeń wydajności mieszanin popiołowo-wodnych w konkretnej instalacji transportowej dla tego modelu.

Z uwagi na indywidualne, niepowtarzalne przestrzenne usytuowanie instalacji transportowych, wymagających optymalizacji parametrów wydajnościowych (udział masowy części stałych do wody), a więc i parametrów reologicznych trudno spotkać przykład obliczeń parametrów hydrotransportu w takim szerokim zakresie publikowanych w literaturze, aby można je było w sposób istotny porównywać [1, 2, 3, 4, 13, 14].

Masowe stosunki części stałych do wody (S:W) dla poszczególnych mieszanin popiołowo-wodnych sporządzonych na bazie popiołów „fluidalnych”, „bez odsiarczania” i popiołu „pól suchego” przedstawiono na rysunku 1. Wraz ze wzrostem udziału zasolonej wody w hydromieszaniu (wzrost rozlewności) stosunek S:W maleje. Mieszaniny zawierające z tej samej „grupy rodzajowej” popioły lotne charakteryzują się podobnymi rezultatami. Dla popiołów fluidalnych wyraźnie widać, że do sporządzenia mieszanin o najmniejszej rozlewności 160 mm proporcje S:W są zbliżone i wynoszą około 0,9–1,05:1, zaś dla rozlewności 280 mm mieszczą się w przedziale 0,6:1–0,76:1. Mieszaniny sporządzone z popiołów bez odsiarczania dla rozlewności 160 mm posiadają takie same proporcje masowe popiołu do wody 2,5:1, zaś dla rozlewności 280 mm 1,5–1,6:1.

Na rysunku 2 przedstawiono zależność gęstości przebadanych mieszanin popiołowo-wodnych od rozlewności. Podobnie jak dla zależności udziałów masowych od rozlewności

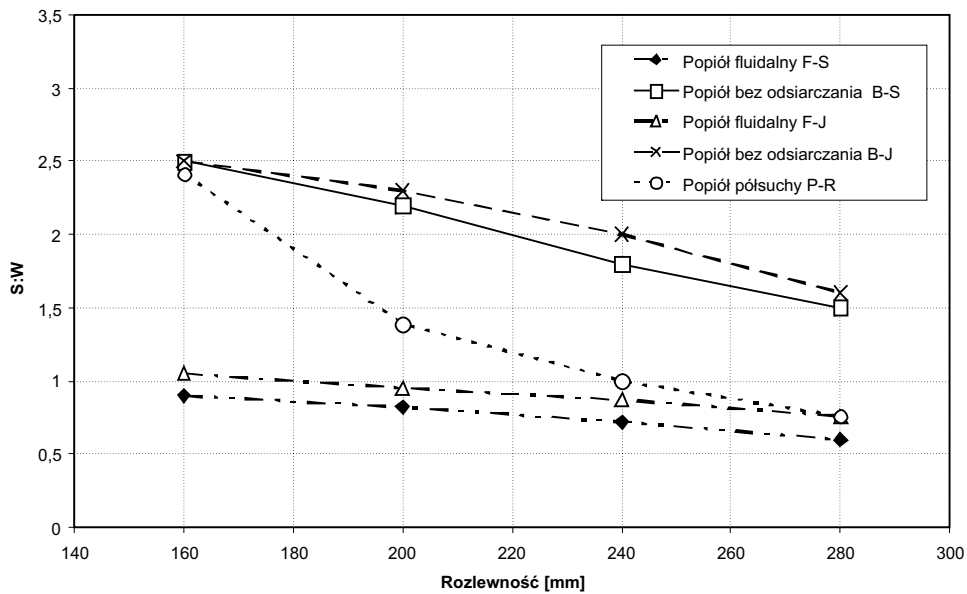
TABELA 1. Wybrane własności fizyczne mieszanin popiołowo-wodnych

TABLE 1. Selected physical parameters of fly ash – water mixtures

Rodzaj popiołu gęstość właściwa	Rozlewność mieszaniny $R$ [mm]	Masowy stosunek cz. st. do wody S:W	Gęstość mieszaniny $\rho_m$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Koncentracja objętościowa $C_V$ [-]	Granica płynięcia $\tau_0$ [Pa]	Dynamiczny współcz. lepkości $\eta_B$ [Pa·s]
Popiół fluidalny „F-S” $\rho_s = 2689$ [kg/m <sup>3</sup> ]	160	0,9 : 1	1445	0,255	106,10	0,6519
	200	0,82 : 1	1416	0,237	77,38	0,2479
	240	0,72 : 1	1378	0,215	57,35	0,1342
	280	0,6 : 1	1329	0,185	32,18	0,1107
Popiół bez odsiarczania „B-S” $\rho_s = 2017$ [kg/m <sup>3</sup> ]	160	2,5 : 1	1577	0,558	111,50	0,6903
	200	2,25 : 1	1551	0,532	86,85	0,2560
	240	1,8 : 1	1495	0,477	47,90	0,1702
	280	1,5 : 1	1450	0,431	35,71	0,1050
Popiół fluidalny „F-J” $\rho_s = 2614$ [kg/m <sup>3</sup> ]	160	1,05 : 1	1483	0,291	131,60	0,3860
	200	0,95 : 1	1451	0,270	99,04	0,2494
	240	0,87 : 1	1424	0,253	72,78	0,1603
	280	0,76 : 1	1385	0,229	49,70	0,1204
Popiół bez odsiarczania „B-J” $\rho_s = 2063$ [kg/m <sup>3</sup> ]	160	2,5 : 1	1597	0,553	116,03	0,3506
	200	2,25 : 1	1569	0,527	81,35	0,2076
	240	2 : 1	1539	0,497	52,77	0,1475
	280	1,6 : 1	1481	0,442	33,41	0,1207
Popiół z półsuchej met. odsiar. spalin „P-R” $\rho_s = 2340$ [kg/m <sup>3</sup> ]	160	2,41 : 1	1680	0,507	73,42	0,2430
	200	1,39 : 1	1500	0,373	55,67	0,154
	240	1,00 : 1	1400	0,299	27,25	0,0622
	280	0,76 : 1	1330	0,246	13,82	0,0267

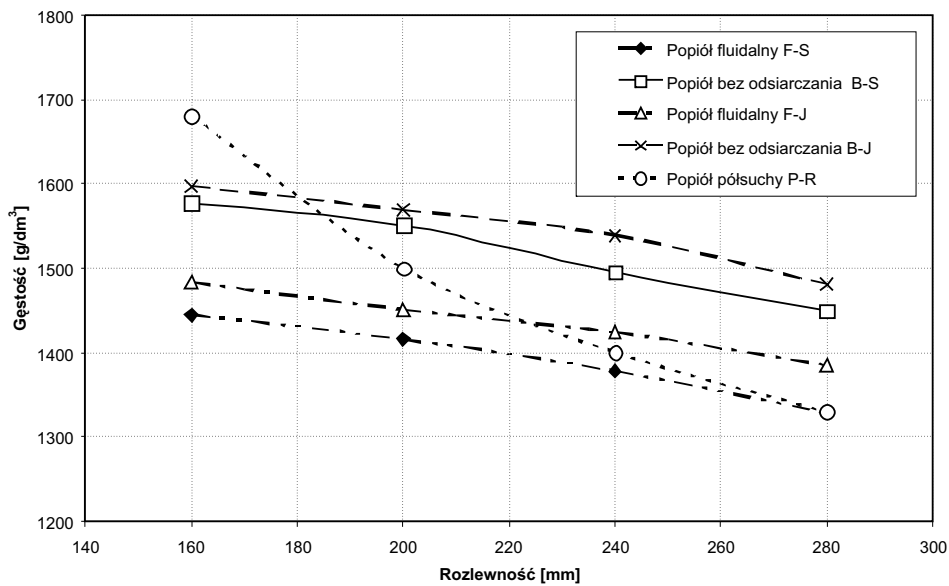
widać, że mieszaniny sporządzone z tego samego rodzaju popiołu posiadają dla takiej samej rozlewności zbliżone gęstości. Związane jest to bezpośrednio z podobnymi wartościami gęstości właściwych tych popiołów (tab. 1) oraz podobną wielkością tzw. „wodożądności” czyli ilością potrzebnej wody dla otrzymania określonej rozlewności hydromieszaniny (rys. 3). Dla przykładu mieszaniny sporządzone na bazie popiołów fluidalnych z różnych elektrowni wykazują się podobną gęstością dla rozlewności 160 mm (1445 g/dm<sup>3</sup>, 1483 g/dm<sup>3</sup> dla F-J), jak i dla rozlewności 280 mm (1329 g/dm<sup>3</sup> dla F-S, 1385 g/dm<sup>3</sup> dla F-J).

Istotnymi parametrami reologicznymi hydromieszaniny z punktu widzenia oporów przepływu w rurociągach transportowych są granica płynięcia oraz dynamiczny współczynnik



Rys. 1. Zależność masowego stosunku popiołu do wody (S:W) od rozlewności badanych mieszanin

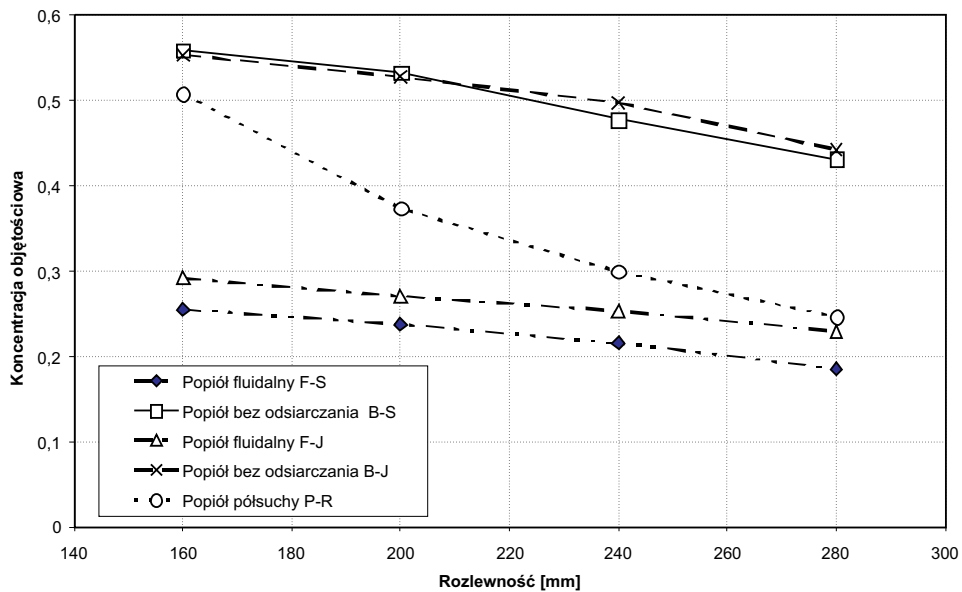
Fig. 1. Influence of table spread on solids to water ratio (S/W) of tested mixtures



Rys. 2. Zależność gęstości mieszanin popiołowo-wodnych od rozlewności badanych mieszanin

Fig. 2. Influence of table spread on density of fly ash – water mixtures

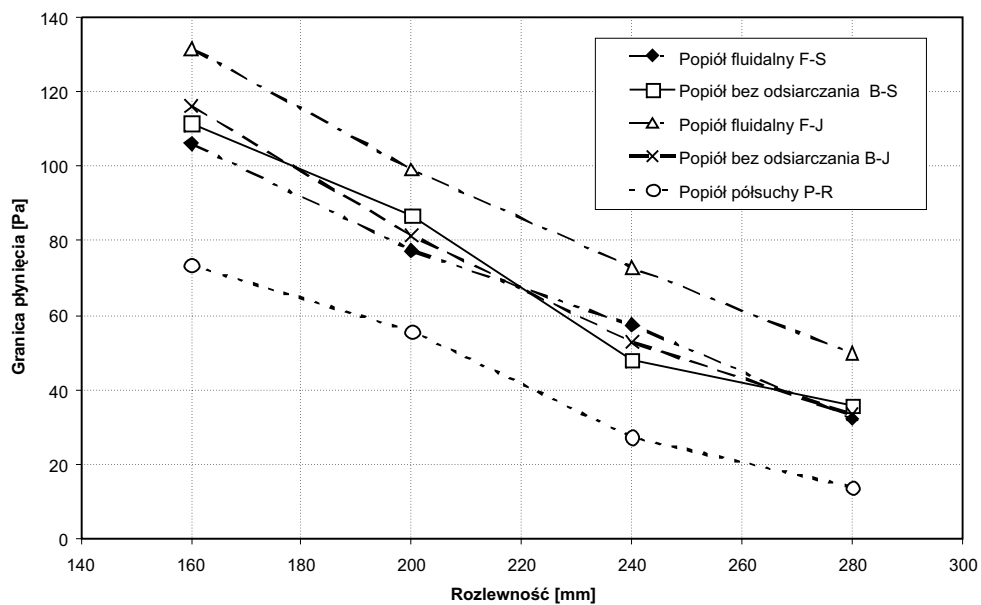
lepkości. Analizowane mieszaniny sporządzone z popiołu fluidalnego F-J charakteryzują się najwyższymi wartościami granicy płynięcia w zakresie przebadanej rozlewności, czyli od 160 do 280 mm. Natomiast najmniejszymi wartościami granicy płynięcia (rys. 4) oraz



Rys. 3. Zależność koncentracji objętościowej badanych mieszanin od rozlewności

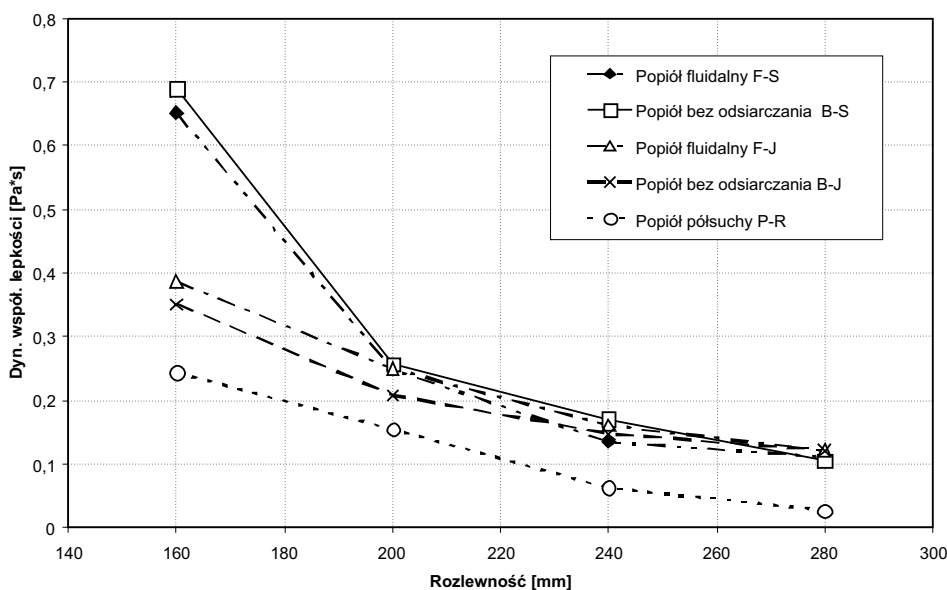
Fig. 3. Influence of table spread on volumetric concentration of analyzed mixtures

dynamycznego współczynnika lepkości (rys. 5) w badanym zakresie rozlewności charakteryzuje się mieszanina z udziałem popiołu z produktami półsuchego odsiarczania P-R.



Rys. 4. Zależność granicy płynięcia badanych mieszanin od rozlewności

Fig. 4. Influence of table spread on yield stress of analyzed mixtures



Rys. 5. Zależność lepkości badanych mieszanin od rozlewności

Fig. 5. Influence of table spread on viscosity of analyzed mixtures

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań podstawowych własności fizycznych oraz własności reologicznych hydromieszanin popiołowo-wodnych o różnej koncentracji części stałych. Dla pokazania różnic własności emulgatorów popiołowo-wodnych wynikających z obecnie stosowanych w polskiej energetyce różnych metod odsiarczania – co skutkuje powstawaniem popiołów lotnych o różnych właściwościach fizycznych i chemicznych – do badań wybrano popioły lotne z trzech różnych polskich zakładów energetycznych i różnych metod odsiarczania. Popioły z kotłów fluidalnych (tzw. sucha metoda odsiarczania w złożu fluidalnym), popioły z produktami półsuchego odsiarczania spalin oraz popiół bez odsiarczania. Znajomość własności fizycznych i reologicznych hydromieszanin jest niezbędna przy wyznaczaniu objętościowego natężenia przepływu w grawitacyjnych instalacjach transportowych powszechnie wykorzystywanych przy odzysku tych odpadów w podziemnych kopalniach węgla kamiennego.

Objętościowe natężenie przepływu w grawitacyjnej instalacji hydrotransportu związane jest bezpośrednio z różnicą wysokości wlotu i wylotu z rurociągu, długością rurociągu oraz własności fizycznych i reologicznych hydromieszaniny transportowanej, a największą wydajność uzyskuje się przy tzw. „pełnym zasilaniu”. Pełne zasilanie instalacji wymaga dozowania składników mieszaniny, a więc i ich przygotowania w stacji wytwarzania, w ilościach odpowiadających rzeczywistemu natężeniu przepływu, jakie dla przyjętej mieszaniny ukształtuje się w rozpatrywanym rurociągu transportowym. W przypadku zasilania

instalacji mniejszą ilością mieszaniny niż wynika to z rzeczywistych warunków przepływu, mamy do czynienia z tzw. wolnym spadem w górnej części rurociągu pionowego i przepływem pełnym przekrojem w pozostałej jego części. W tym przypadku o wydajności instalacji oprócz własności reologicznych hydromieszaniny decyduje wysokość słupa mieszaniny przepływającej całym przekrojem w rurociągu pionowym instalacji. Z uwagi na ilość potrzebnej wody do sporządzania hydromieszaniny, ilość wody odciekowej którą należy wypompować z wyrobisk podziemnych, a także chęć zagospodarowania jak największej ilości odpadów, w technologiach górniczych wykorzystujących w formie odzysku popioły lotne zależy nam szczególnie na sporządzaniu hydromieszanin o jak najmniejszej rozlewności. Biorąc pod uwagę fakt stałości parametrów geometrycznych instalacji grawitacyjnej na zmianę objętościowego natężenia przepływu możemy wpływać poprzez zmianę parametrów fizycznych i reologicznych hydromieszaniny. Jak wynika z badań zaprezentowanych w artykule zmiana parametrów reologicznych hydromieszanin ściśle związana jest z jej rozlewnością i rodzajem zastosowanego popiołu lotnego.

Przeprowadzone badania jednoznacznie wskazują podobieństwo własności fizycznych i reologicznych dla poszczególnych rodzajów grup popiołowych (popioły fluidalne i popioły z produktami półsuchego odsiarczania spalin). Wskazują również na znaczne różnice własności reologicznych hydromieszanin o takiej samej konsystencji (rozlewności). Szczególnie jest to widoczne w przypadku hydromieszanin o małej rozlewności (dużej koncentracji części stałych) dla których dynamiczny współczynnik lepkości (rys. 5) przy rozlewności 160 mm zmienia się od wartości 0,24 Pa·s dla hydromieszaniny sporządzonej na bazie popiołu P-R do wartości 0,69 Pa·s dla hydromieszaniny sporządzonej na bazie popiołu bez odsiarczania B-S. Prawie trzykrotna różnica wielkości dynamicznego współczynnika lepkości posiada istotne znaczenie z punktu widzenia hydrotransportu w instalacjach grawitacyjnych. Oznaczać to może, że dla danej instalacji hydrotransport mieszaniny o rozlewności 160 mm sporządzonej na bazie popiołu B-S może być już niemożliwy.

Zaprezentowane wyniki zostały uzyskane przy realizacji projektu badawczego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr R 0900801 pt. „Opracowanie zasad i środków tworzenia sztucznych barier dla podziemnego składowiska odpadów niebezpiecznych w kopalniach likwidowanych”.

## Literatura

- [1] ERICKSSON M., FRIEDRICH M., VORSCHULZE C., 2004 – Variations in the rheology and penetrability of cement-based grouts – an experimental study. *Cement and Concrete Research* 34, pp. 1111–1119.
- [2] FERRARIS C.F., BROWER L.E., 2003 – Comparison of Concrete Rheometers. *Concrete International*, Vol. 25, No. 8, pp. 41–47, August 2003.
- [3] HOLLINDERBÄUMER E.W., MEZ W., 1998 – Viscosity Controlled Production of High Concentration Backfill Pastes. *Proceedings of Sixth International Symposium on Mining with Backfill*, Brisbane, Australia, 19–23 April, pp. 43–47.



- [4] KEMBŁOWSKI Z., 1973 – Reometria płynów nienewtonowskich. WNT, Warszawa.
- [5] PALARSKI J., PLEWA F., POPCZYK M., 2007 – Możliwości określania własności mieszanin zestalających stosowanych w podziemnych technologiach górniczych na podstawie rozlewności. Konferencja IV Warsztaty: Popioły lotne i spoiwa mineralne w technologiach górniczych. Wisła, 14–15 czerwca.
- [6] PLEWA F., MYSŁEK Z., 2001 – Zagospodarowanie odpadów przemysłowych w podziemnych technologiach górniczych. Wyd. Politechniki Śl., Gliwice.
- [7] PLEWA F., POPCZYK M., MYSŁEK Z., 2007 – Optymalizacja składu mieszaniny odpadów przemysłowych stosowanych w technologii doszczelniania zrobów zawałowych. Szkoła Eksploatacji Podziemnej Szczyrk 19–23.02., str. 413–420. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- [8] PLEWA F., STROZIK G., JENDRUŚ R., 2007 – Proces doszczelniania zrobów zawałowych w świetle badań modelowych. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej 2007. Sympozja i Konferencje nr 69. Szczyrk, 19–23 lutego. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- [9] PLEWA F., POPCZYK M., MYSŁEK Z., 2007 – Rodzaj produktów wytwarzanych w energetyce zawodowej i możliwość ich wykorzystania w podziemnych technologiach górniczych. XXI Konferencja: Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej pt. Paliwa dla energetyki – rynki i technologie. Zakopane, 7–10 października, t. 10, z. spec. 2. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- [10] PLEWA F., POPCZYK M., 2007 – Wyznaczanie wybranych parametrów hydromieszanin wykorzystywanych w technologiach górniczych w funkcji rozlewności. Międzynarodowa Konferencja VIII Szkoła Geomechaniki 2007. Gliwice-Ustroń, 16–19 październik. Z. specjalny, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [11] PLEWA F., STROZIK G., 2007 – Analiza wybranych metod doboru składu mieszanin drobnofrakcyjnych odpadów przemysłowych dla technologii hydraulicznego wypełniania pustek w górotworze w świetle badań laboratoryjnych. Międzynarodowa Konferencja VIII Szkoła Geomechaniki 2007. Gliwice-Ustroń, 16–19 październik. ZN. Pol. Śl.- specjalny, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [12] Polska Norma PN-G-11011. Materiały do podsadzki zestalonej i doszczelniania zrobów. Wymagania i badania.
- [13] ULIASZ-BOCHEŃCZYK A., 2007 – Wpływ dodatków na własności zawiesin popiołowo-wodnych. XVI Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Szczyrk, 19–23 lutego.
- [14] YAHIA A., KHAYAT K.H., 2003 – Applicability of rheological models to high performance grouts containing supplementary cementitious materials and viscosity enhancing admixture. *Materials and Structures*, Vol. 36, July 2003, pp. 402–412.

Franciszek PLEWA, Marcin POPCZYK

## Measurement of rheological properties of hydraulic mixtures made with use of power generation waste

### Abstract

Polish coal mines utilize fly ash from power generation as a form of waste recovery in underground technologies for years. Physical and between them rheological parameters of hydraulic mixtures is essential for prediction of flow parameters in gravitational pipelines systems, which are used widely by mines. The paper presents results of research on general physical and rheological parameters of fly ash – water mixtures of different concentration of solids. In aim to show the differences of properties of mixtures made with waste from different methods of desulphurization, which result in wide range of physical and chemical properties of fly ash, ash from three different Polish power plants with different methods of desulphurization have been selected for this research: ash from fluidized bed (dry method of desulphurization in fluidized bed, fly ash with products of semi-dry desulphurization method, and fly ash from combustion without any desulphurization. As the presented in this paper research results show, change of rheological properties of mixtures is strongly related with their table spread and type of fly ash. Results of tests indicate significant similarity of physical and rheological properties of mixture made with fly ash from each groups (ash from fluidized bed and ash with semi-dry desulphurization by-products). They indicate also on large differences of rheological properties of mixtures of the same table spread (consistency). This especially visible in case of mixtures of small table spread (high solids concentration). Dynamic coefficient of viscosity of mixtures characterized by table spread diameter of 160 mm changes from 0.24 Pa·s for mixture made with P-R fly ash up to 0.69 Pa·s for mixtures with B-S fly ash (see Fig. 5). Almost three times difference of dynamic viscosity coefficient is of great importance from the point of view of hydraulic transportation in gravitational pipelines. It could happened that in a certain pipeline transportation of mixture characterized by table spread diameter 160 mm made with fly ash type B-S would be impossible.

Research presented in this paper have been financially supported by the Polish Ministry Of Science and Higher Education within the grant R 0900801 titled „Opracowanie zasad i środków tworzenia sztucznych barier dla podziemnego składowiska odpadów niebezpiecznych w kopalniach likwidowanych”.

KEY WORDS: waste management, fly ash, hydraulic transport