

KLAUDIA KOJDER, MAŁGORZATA ŚLIWKA

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Katedra Inżynierii Środowiska, e-mail: sliwka@agh.edu.pl

OCENA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA POPIOŁÓW ZE SPALANIA BIOMASY W REKULTYWACJI BIOLOGICZNEJ

Odpady energetyczne powstające w wyniku spalania paliw stałych, stanowią duże obciążenie dla środowiska ze względu na ich właściwości fizykochemiczne oraz ilość. Popioły lotne i denne ze spalania węgla brunatnego i kamiennego wykorzystuje się między innymi w drogownictwie, budownictwie, górnictwie, jako materiał podsadzkowy, a także w rolnictwie. Popioły ze spalania biomasy, z uwagi dużą zmienność właściwości fizykochemicznych oraz często wysoką zawartość metali ciężkich i chloru, nie znalazły szerokiego zastosowania. W artykule omówiono wstępne doświadczenia związane z oceną właściwości popiołów fluidalnych ze spalania biomasy pod kątem możliwości ich przyrodniczego wykorzystania. Wyniki przeprowadzonych doświadczeń wykazały możliwość wykorzystania przyrodniczego popiołów dennych do poprawy właściwości fizykochemicznych gleb w rekultywacji terenów zdegradowanych.

Słowa kluczowe: popioły fluidalne, popioły z biomasy, popioły lotne, popioły denne, fitotoksyczność, rekultywacja

I. WSTĘP

Przemysł energetyczny stanowi istotne źródło powstawania różnego rodzaju odpadów, które mogą przyczynić się do zanieczyszczenia i degradacji środowiska. Energetyczne spalanie paliw stałych generuje przede wszystkim powstawanie popiołów lotnych i dennych (żużli), które w zależności od ich właściwości fizykochemicznych mogą być w różny sposób zagospodarowane [Rosik-Dulewska 2020]. Popioły powstające po spalaniu węgla kamiennego i węgla brunatnego wykorzystuje się między innymi: w budownictwie, drogownictwie, górnictwie (jako materiał podsadzkowy), a także jako materiał poprawiający właściwości gleby w pracach rekultywacyjnych i w rolnictwie [Myszkowska i in. 2010, Uliasz-Bocheńczyk i in. 2015]. Energetyczne wykorzystanie w energetyce zawodowej biomasy jako paliwa spalanego, bądź współspalanego z paliwem kopalnym przyczyniło się do powstania znacznych ilości popiołów o właściwościach innych niż popioły ze spalania węgla kamiennego i brunatnego. Popioły te charakteryzują się bardzo dużą zmiennością właściwości fizycznych i chemicznych, które uzależnione są od warunków spalania oraz parametrów spalanego paliwa [Gawlicki 2014, Kępys i Pomykała 2014, Wacławowicz i in. 2017, Wójcik i Masłoń 2018, Śliwka i in. 2017]. Uboczne produkty spalania (UPS) z biomasy mogą charakteryzować się podwyższoną zawartością metali

ciężkich i chlorków, w zależności od rodzaju spalanej biomasy i jej pochodzenia, stanowią także istotne źródło makro i mikrośladników dla roślin [Bilenda i Meller 2018, Ciesielczuk i in. 2011, Kowalczyk-Juško 2009]. W zależności od właściwości chemicznych, tego typu odpady powinny znaleźć zatem zastosowanie także jako materiał poprawiający właściwości gleby, szczególnie w pracach rekultywacyjnych, przygotowaniu podłoża oraz na przykład jako materiał nawozowy na terenach upraw energetycznych. Każdorazowe wykorzystanie przyrodnicze UPS z biomasy powinno być jednak poprzedzone wnikliwą analizą ich właściwości fizycznych i chemicznych.

Celem przeprowadzonych badań, była wstępna ocena możliwości wykorzystania popiołów lotnych i żużli pochodzących ze spalania biomasy w tej samej instalacji do energetycznego spalania biomasy. Przeprowadzone doświadczenia mają charakter wstępny i wymagają kontynuowania badań.

II. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Materiał do badań stanowiły popioły lotne i żużle z energetycznego spalania biomasy roślinnej w kotle fluidalnym. Materiał pochodził z elektrowni biomasowej. Właściwości fizyczne i chemiczne popiołów zostały oznaczone we wcześniejszych badaniach [Śliwka i in. 2017] (tab. 1).

Tabela 1 - Table 1

Wybrane właściwości popiołu lotnego (PL) i żużlu (popiół denny)(PD) ze spalania biomasy w kotle fluidalnym / *Selected properties of fly ash (PL) and bottom ash (PD) from biomass combustion*

	Jednostka / Unite	Popiół lotny / Fly ash	Popiół denny / Bottom ash
pH	-	>12	11,69
Skład ziarnowy / <i>Granulometric composition</i>			
Piasek / Sand	%	51,33	96
Pył / Dust	%	48,77	1,1
Skład chemiczny / <i>Chemical composition</i>			
K	mg·kg ⁻¹	138651,16	16193,28
Ca	mg·kg ⁻¹	141153,27	25623,48
Mg	mg·kg ⁻¹	39041,48	6705,92
P	mg·kg ⁻¹	33562,73	4429,34
Mn	mg·kg ⁻¹	4390,76	1245,93
Cd	mg·kg ⁻¹	13,37	1,48
Pb	mg·kg ⁻¹	197,75	175,27
Hg	mg·kg ⁻¹	0,18	0,07
Chlorki / <i>Chlorides</i>	mg·dm ⁻³	1094,00	44,10
Siarczany / <i>Sulfates</i>	mg·dm ⁻³	8480,00	509,90

Właściwości fitotoksyczne badanych popiołów oceniano przy pomocy standardowego testu fitotoksyczności względem *Lepidium sativum*. Przeprowadzono także doświadczenie wazonowe z wykorzystaniem roślin testowych: *Lepidium sativum* i *Sinapis alba* [Kuczyńska i in. 2003, Traczewska 2011].

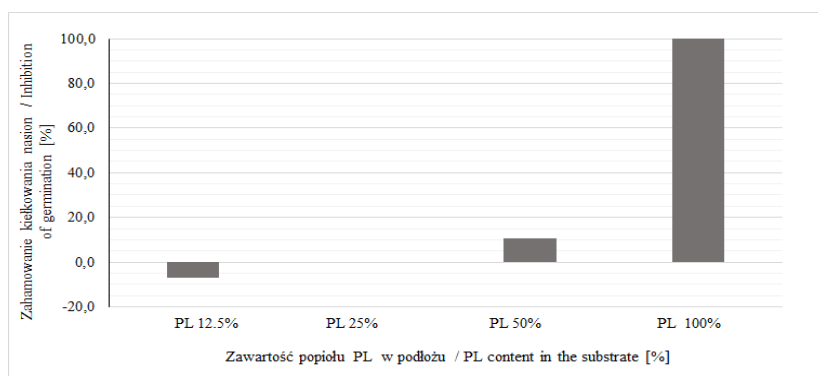
Przed wykonaniem testu, sporządzono standardowy wyciąg wodny z badanych próbek odpadów (zgodnie z PN-EN 12457-2)[8]. Następnie przygotowano szereg rozcieńczeń wyciągu wodnego z wodą destylowaną w proporcjach: 1:1, 1:2, 1:4, 1:8 dla każdego z rodzajów odpadów. W kolejnym etapie doświadczenia, do szklanych szalek Petriego wprowadzono po 5 ml roztworów, po 3 powtórzenia dla każdego z rozcieńczeń oraz każdego rodzaju odpadów. Przygotowano także 3 obiekty kontrolne z wodą destylowaną,

jako obiekty odniesienia. Następnie do każdej szalki wprowadzono po 10 nasion *Lepidium sativum*. Nasiona poddano inkubacji w ciemności, w temperaturze 22°C przez 72 godziny. Po zakończeniu inkubacji, zmierzono długość korzeni roślin testowych oraz określono hamowanie kiełkowania nasion i hamowanie wzrostu korzeni w zależności od stężenia roztworu wyciągu wodnego oraz rodzaju odpadów.

Doświadczenie wegetacyjne przeprowadzono z udziałem dwóch gatunków roślin testowych. Przygotowano podłoża do uprawy roślin testowych, które stanowiły mieszanki gleby uniwersalnej do uprawy roślin (pH 5,5-6,5) i badanych popiołów w ilości odpowiednio: 10%, 20%, 30% i 40% (wagowo), oddzielenie dla każdego rodzaju popiołów. Podłoże odniesienia stanowiła gleba wykorzystana do przygotowania podłoża testowego, bez dodatku popiołów. Do jednakowych doniczek wsypano przygotowane podłoża doświadczalne, w ilości po cztery powtórzenia dla każdego przygotowanego rodzaju podłoża i wysiano po 10 nasion roślin testowych. Uprawę roślin prowadzono w szafie uprawowej, pozwalającej na zachowanie podobnych warunków temperatury i naświetlenia dla wszystkich obiektów doświadczalnych. W czasie trwania doświadczenia, rośliny podlewano systematycznie jednakową ilością wody destylowanej. Po 14 dniach uprawy zmierzono przyrost części nadziemnych i korzeni roślin testowych w obiektach doświadczalnych i kontrolnych.

III. WYNIKI I DYSKUSJA

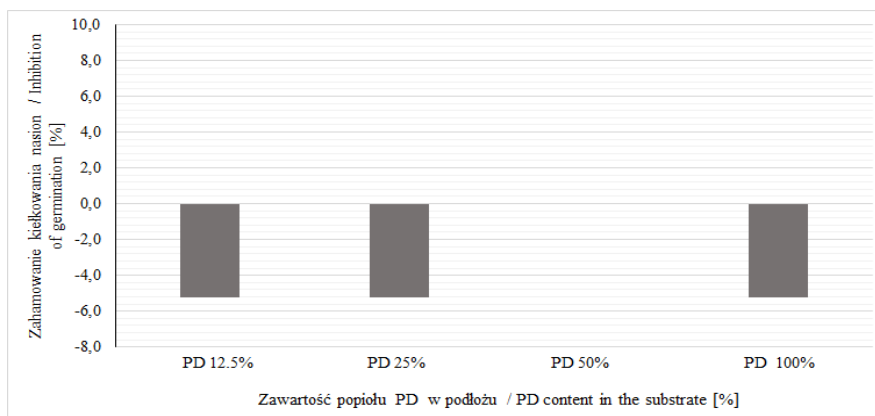
Wyniki uzyskane w teście kiełkowania *Lepidium sativum* na wyciągach wodnych z badanych odpadów wykazały negatywny wpływ popiołów lotnych (PL) na kiełkowanie nasion roślin testowych. Stwierdzono hamowanie kiełkowania względem obiektu kontrolnego dla stężeń 50% oraz 100% wyciągu wodnego z popiołów lotnych. Dla stężenia 12,5% stwierdzono wyższe kiełkowanie w stosunku do obiektu kontrolnego, natomiast dla stężenia 25% kiełkowanie było podobne jak w obiektach kontrolnych (rys. 1). Na zahamowanie kiełkowania wpłynęła wysoka zawartość siarczanów i chlorków w wyciągu wodnym z popiołów lotnych z biomasy. Popioły lotne z biomasy charakteryzują się zazwyczaj wysoką zawartością chloru, zawartość siarczanów związana jest ze specyficznymi warunkami spalania paliwa biomasowego.



Rys. 1. Zahamowanie kiełkowania *Lepidium sativum* w wyciągu wodnym z popiołów lotnych dla poszczególnych obiektów doświadczalnych

Fig. 1. Inhibition of germination of *Lepidium sativum* in water extract from fly ash

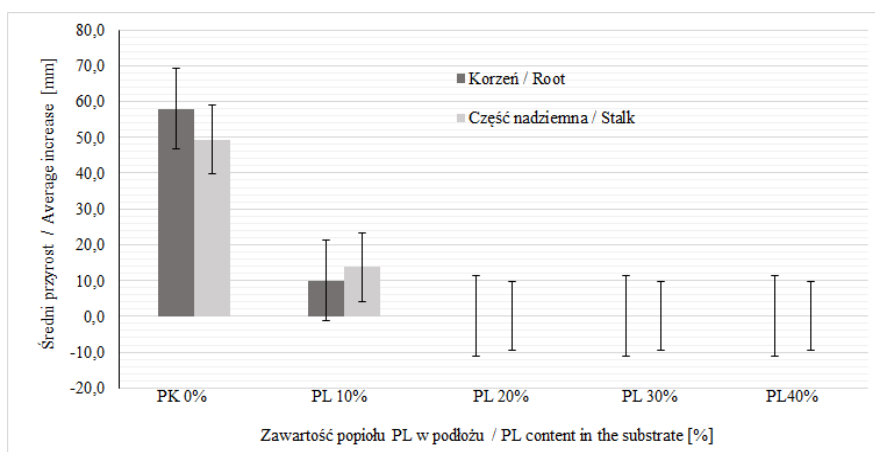
W przypadku żużli (PD) nie stwierdzano efektu hamowania kiełkowania względem obiektu kontrolnego dla żadnego z przygotowanych roztworów wyciągu wodnego z odpadu (rys. 2).



Rys. 2. Zahamowanie kiełkowania *Lepidium sativum* w wyciągu wodnym z żużli (PD) dla poszczególnych obiektów doświadczalnych

Fig. 2. Inhibition of germination of *Lepidium sativum* in water extract from bottom ash

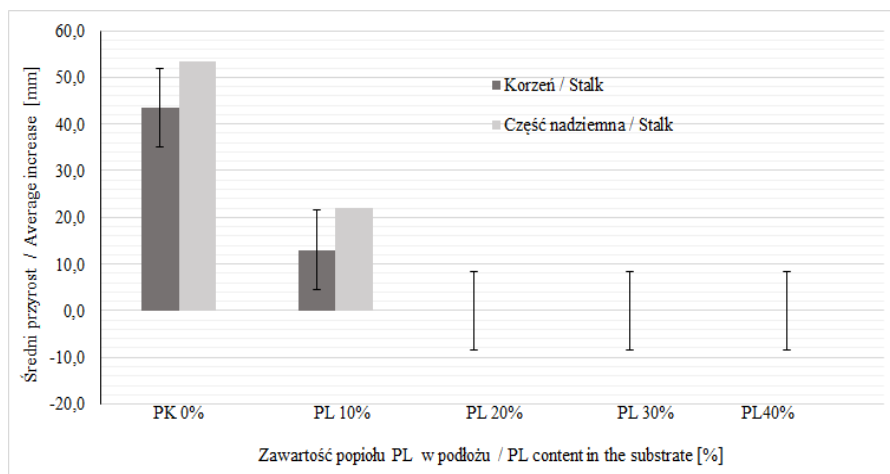
Przeprowadzone doświadczenie wazonowe pozwoliło na ocenę wpływu badanych UPS na kiełkowanie i wczesny wzrost roślin testowych w podłożu z dodatkiem popiołów lotnych i żużli. Stwierdzono silne ograniczenie kiełkowania i wzrostu *Lepidium sativum* dla zawartości 30% i 40% popiołów (PL) w podłożu (rys. 3).



Rys. 3. Przyrost biomasy *Lepidium sativum* w podłożach z różną zawartością popiołów lotnych (PL) w porównaniu z obiektem kontrolnym (PK)

Fig. 3. Increase of *Lepidium sativum* biomass cultivated in the substrates with different fly ash (PL) content in comparison with control object (PK), (blue colour – roots, red colour - upper stalks)

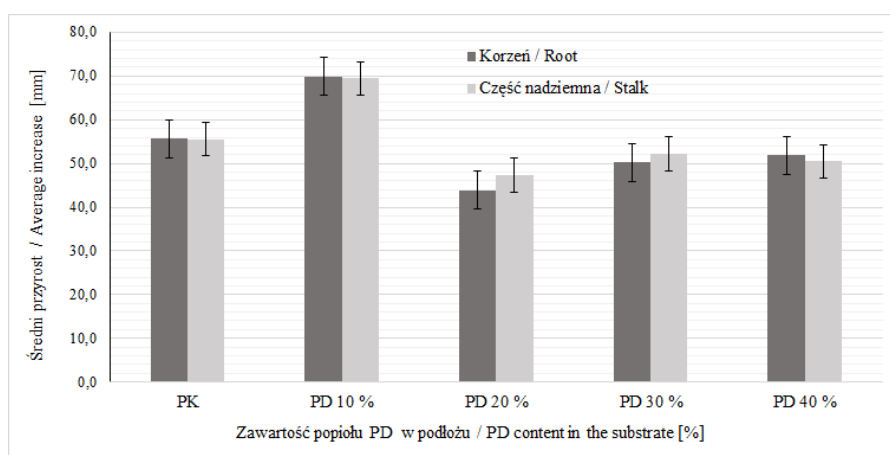
W przypadku obiektów doświadczalnych z *Sinapis alba* stwierdzono silne ograniczenie kiełkowania i wzrostu roślin na przygotowanych podłożach z dodatkiem popiołów lotnych dla wszystkich mieszanek (zawartość UPS: 10%, 20%, 30% oraz 40%) (rys. 4). Negatywny wpływ badanych popiołów był związany ze składem chemicznym odpadów oraz ich wodoznością, która przyczyniła się zestalenia podłoża.



Rys. 4. Przyrost biomasy *Sinapis alba* w podłożach z różną zawartością popiołów lotnych (PL) w porównaniu z obiektem kontrolnym (PK)

Fig. 4. Increase of *Sinapis alba* biomass cultivated in the substrates with different fly ash (PDL) content in comparison with control object (PK), (blue colour – roots, red colour - upper stalks)

Dodatek do podłoża uprawowego popiołów dennych (PD) korzystnie wpłynął na wzrost i rozwój obu gatunków roślin testowych. W przypadku obiektów doświadczalnych z *Lepidium sativum* stwierdzono korzystny wpływ 10% dodatku żużlu w podłożu. Dla większych zawartości PD zauważono nieznacznie niższy przyrost średniej biomasy korzeni i części nadziemnych roślin testowych (rys. 5).



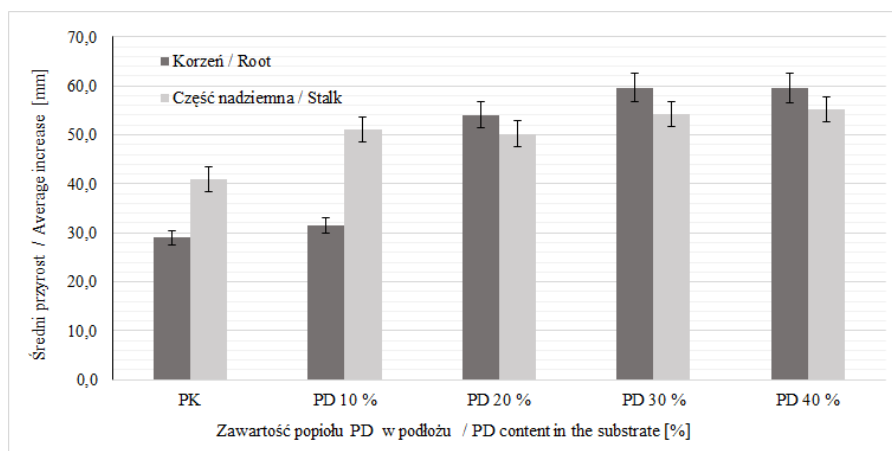
Rys. 5. Przyrost biomasy *Lepidium sativum* uprawianej w podłożach z różną zawartością żużli (PD), w porównaniu z obiektem kontrolnym (PK)

Fig. 5. Increase of *Lepidium sativum* biomass cultivated in the substrates with different bottom ash (PD) content in comparison with control object (PK), (blue colour – roots, red colour - upper stalks)

Dodatek popiołów dennych (PD) do podłoża spowodował istotny przyrost biomasy *Sinapis alba* w przypadku każdej domieszki UPS w podłożu. Zaobserwowano większy

przyrost biomasy korzeni i części nadziemnych roślin w porównaniu z grupą kontrolną. Wraz ze wzrostem zawartości popiołów w podłożu, znacznie zwiększała się biomasa roślin, szczególnie korzeni roślin (rys. 6).

Na wzrost roślin testowych miał wpływ skład ziarnowy żużli (PD) oraz znaczna zawartość makroskładników (właściwości nawozowe popiołów), które stymulowały rozwój.



Rys. 6. Przyrost biomasy *Sinapis alba* uprawianej w podłożach z różną zawartością żużli (PD) w porównaniu z obiektem kontrolnym (PK)

Fig. 6. Increase of *Sinapis alba* biomass cultivated in the substrates with different bottom ash (PD) content in comparison with control object (PK), (blue colour – roots, red colour - upper stalks)

IV. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wstępne związane z oceną możliwości wykorzystania popiołów fluidalnych lotnych i dennych powstających podczas energetycznego spalania biomasy wykazały pewną możliwość zastosowania badanych UPS do poprawy właściwości fizykochemicznych gleb, np. w pracach rekultywacyjnych. Wyniki przeprowadzonego testu fitotoksyczności wykazały niekorzystny wpływ badanych popiołów fluidalnych na kiełkowanie i rozwój *Lepidium sativum*. W doświadczeniu wegetacyjnym, dodatek popiołów lotnych do podłoża, silnie ograniczył rozwój *Sinapis alba*, natomiast *Sinapis alba* tolerowała dodatek tych UPS do ich zawartości 20% w podłożu. Badane popioły lotne wykazały tendencję do zestalania podłoża i zahamowały wzrost roślin testowych. Na efekt fitotoksyczny wpłynęła także wysoka zawartość siarczanów oraz chlorków w popiołach lotnych. Test fitotoksyczności popiołu dennego względem *Lepidium sativum* nie wykazał zahamowania kiełkowania i wzrostu roślin testowych. Popioły denne dodane do podłoża uprawowego korzystnie wpłynęły na wczesny wzrost i rozwój u obu gatunków roślin testowych przy czym, dodatni efekt dodatku PD do podłoża był bardziej widoczny w przypadku *Sinapis alba*. Przyrodnicze wykorzystanie popiołów dennych, np. w rekultywacji, do poprawy właściwości fizykochemicznych gleby z uwagi na skład ziarnowy tego typu popiołów oraz istotną zawartość makro- i mikroskładników pokarmowych stanowi pewną szansę na zagospodarowanie odpadów energetycznych z biomasy. Z uwagi jednak na dużą zmienność właściwości fizykochemicznych popiołów z biomasy, każdorazowe ich przyrodnicze zastosowanie, powinno być poprzedzone

wnikliwą analizą ich właściwości. Przeprowadzone badania miały charakter wstępny, doświadczenia wazonowe wymagają kontynuacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Bilenda E., Meller E. 2018. Wpływ popiołów ze spalania biomasy na odczyn, właściwości sorpcyjne i zawartość przyswajalnych form makroelementów w glebie. *Przemysł chemiczny*. 7 (5). 678-681.
2. Ciesielczuk T., Kusza G., Nems A. 2011. Nawożenie popiołami z termicznego przekształcania biomasy źródłem pierwiastków śladowych dla gleb. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*. 49. 219-226.
3. Gawlicki M., Graur Z., Ślęzak E. 2014. Popioły lotne ze spalania biomasy jako składnik spoiw drogowych. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*. 19. 34-46.
4. Kępys W., Pomykała R. 2014. Research into the Usefulness of Ash from the Co-Combustion of Lignite and Biomass in Mining Technologies. *Pol. J. Environ. Stud.* 23 (4). 1381-1384.
5. Kowalczyk-Juśko A. 2009. Popiół z różnych roślin energetycznych. *Proceedings of ECOpole*. 3 (1). 159-164.
6. Kuczyńska A., Wolska L., Namieśnik J. 2003. Zastosowanie biotestów w badaniach środowiskowych. Nowe horyzonty i wyzwania w analityce i monitoringu środowiskowym. CEAM. Gdańsk.
7. Myszkowska A., Świdarska-Ostapiak M., Szczypiński T. 2010. Ocena i wytyczne dla wykorzystania popiołów ze współspalania w budownictwie i rolnictwie. *Czysta energia*. 11. 50-53.
8. PN-EN 12457-2. 2006. Charakteryzowanie odpadów. Wymywanie. Badanie zgodności w odniesieniu do wymywania ziarnistych materiałów odpadowych i osadów. Część 2. PKN.
9. Rosik-Dulewska Cz. 2020. Podstawy gospodarki odpadami. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
10. Śliwka M., Pawul M., Kępys W., Pomykała R. 2017. Waste management options for the combustion by-products in the context of the retardation of soil resources' depletion *Journal of Ecological Engineering*. 18 (5). 216-225.
11. Traczewska T. M. 2011. Biologiczne metody oceny skażenia środowiska. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław.
12. Uliasz-Bocheńczyk A., Mazurkiewicz M., Mokrzycki E. 2015. Fly ash from energy production – a waste, by product and raw material. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi - Mineral Resources Management*. 31. 139-150.
13. Wacławicz R., Pelczar G., Polak J. 2017. Metody badania popiołów ze spalania biomasy w aspekcie ich rolniczego wykorzystania. *Przemysł chemiczny*. 96 (12). 2501-2504.
14. Wójcik M., Masłoń A. 2018. Potencjał wykorzystania ubocznych produktów spalania słomy na cele rolniczo-energetyczne. *Ochrona dziedzictwa przyrodniczego i kulturowego istotą zrównoważonego rozwoju społeczno-gospodarczego na terenie Pogórza Dynowskiego. Związek Gmin Turystycznych*. 209-225.

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING ASHES FROM BIOMASS COMBUSTION IN BIOLOGICAL RECLAMATION

Summary

Energy waste generated as a result of fuel combustion is a significant environmental problem, due to its physicochemical properties and a large amount of this waste. Fly ash and bottom ash from lignite and coal combustion are used in various fields of the economy. Ashes from biomass combustion, due to their properties, have not yet found such wide application. The article discusses the preliminary experiments related to the assessment of the properties of fluidized ashes from biomass combustion in terms of their natural use.

Key words: fluidized ash, biomass ash, fly ash, bottom ash, phytotoxicity, reclamation