

POPIOŁY ZE SPALANIA BIOMASY ROŚLINNEJ (FITOPOPIOŁY) – RECYKLING I AGROCHEMICZNY POTENCJAŁ

Jean Diatta

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu,
Katedra Chemii Rolnej i Biogeochemii Środowiska,
ul. Wojska Polskiego 71F, 60-625, Poznań,
e-mail: Jeandiatta63@yahoo.com

Maciej Kowalski

PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna,
Spółka Akcyjna z siedzibą w Bełchatowie,
ul. Węglowa, 597-400, Bełchatów,
e-mail: Maciej.Kowalski@gkpge.pl

STRESZCZENIE

Obowiązujące krajowe regulacje prawne dopuszczają zastosowanie fitopopiołów lotnych o kodzie 10 01 03 do odzysku w procesie R10. Ich w kierunku rolniczym lub leśnym możliwe jest tylko poprzez ich przetwarzanie w instalacjach lub urządzeniach spełniających odpowiednie warunki określone w ustawie o odpadach. Dane zamieszczone w pracy, zdecydowanie pokazują na pozytywny efekt wprowadzenia fitopopiołów do gleby. Warunkuje dostarczeniem łatwo rozpuszczalnego wapnia (Ca), który tą drogą jako CaO reguluje odczyn gleb kwaśnych. Z drugiej strony, wzrasta także buforowość gleby. Jest to cecha podstawowa oraz wyznacznik jakości i produktywności gleby. Należy wskazać na rolę zarówno fitopopiołu jak i pofermentu w kształtowaniu w/w buforowości gleb, której wartości są wyższe w przypadku obiektów z fitopopioły. W przypadku zastosowania polepszaczy [1:1], dawka 40 t ha⁻¹ dała podobny efekt, który się mieści między dawkami 10 a 20 t ha⁻¹ fitopopiołów. Było to spowodowane działaniem „regulującym” materii organicznej, czyli pofermentu. Z uwagi na „wartość nawozową” fitopopioły powinny być przeznaczane do zagospodarowania w kierunkach rolniczym, leśnym lub do celów rekultywacji. Właściwe zagospodarowanie fitopopiołów wymaga przeprowadzenia odpowiedniego programu badawczego, który w swoich założeniach powinien przedstawić społeczeństwu i administracji ich korzystne oddziaływanie i brak negatywnego wpływu na życie, zdrowie ludzi i zwierząt oraz środowisko naturalne.

REGULACJE PRAWNO-ADMINISTRACYJNE: PHYTOPOPIOŁY I BIOMASA ROŚLINNA

Zainteresowanie oraz badania nad składem chemicznym, właściwościami i zastosowaniem popiołów ze spalania biomasy roślinnej tzw. *fitopopioły* można wypatrywać przeważnie w czterech krajach – Stanach Zjednoczonych Ameryki (USA), Finlandii, Szwecji i Danii (Greene, 1988). W USA, fitopopioły pochodzą z przemysłu elektrownianego oraz odpadów przemysłu papierniczego, gdzie ok. 90% przeznaczają się na składowisko. Aczkolwiek, w północno-wschodnich stanach, tylko 15% jest składowane, 80% jest stosowane dogłębowo a 5% kompostowane z osadami ściekowymi. Tą drogą, producenci zmniejszyli do 66% koszty generowane przez składowanie w stanach takich jak Maine i New Hampshire (Campbell, 1990; Vance, 1996).

Zastosowanie fitopopiołów do wapnowania oraz nawożenia gleb, kiedyś praktyka powszechna, było zaniechane na początku 20-ego wieku wraz z pojawieniem się alternatywnych produktów np. wapno, sól potasowa (Maltas, Sinaj, 2014). Obecnie, w kontekście skurczania się nieodnawialnych zasobów kopalnianych, np. złóż fosforytowych i potasowych, należy dążyć do zmniejszenia zależności w stosunku do tych nawozów mineralnych w najbliższej przyszłości. Odpowiednie zagospodarowanie fitopopiołów jest coraz sporym wyzwaniem, natomiast ich zastosowanie dla celów rolniczych stwarza obiecujące perspektywy. Jednak w całym procesie, ocena następstw gospodarczych, rolniczych oraz środowiskowych powinna być ściśle brana pod uwagę.

Fitopopioły są prawdopodobnie najstarszymi nawozami mineralnymi na świecie. W zależności od gatunku, pochodzenia rośliny, części wykorzystywanych do spalania, parametrów procesu spalania i warunków składowania, fitopopioły różnią się znacznie w zakresie ich właściwości fizycznych i chemicznych. Te cechy decydują o jakości różnych rodzajów fitopopiołów i ich przydatności do dalszych zastosowań (Stankowski, Maciorowski 2011; Pitman 2006). Fitopopioły o najbardziej korzystnych właściwościach odżywczych i najmniejszej zawartości metali ciężkich powstają w temperaturze spalania od 600 do 900°C (Pitman 2006).

Z drugiej strony, produkcja biomasy oraz jej spalanie jest jednym z podstaw założeń do programu „Polityka Energetyczna Polski do 2030”, gdzie odgrywa ona szczególną rolę wśród odnawialnych źródeł energii [Styszko i in., 2010; Fijałkowska i Styszko 2011, Xiao i in., 2011; Stolarski i in., 2013b; Raport GUS 2014; Uliasz-Bocheńczyk i Mokrzycki, 2015]. Definicja biomasy zawarta jest w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2005 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji (Dz.U. Nr 260 poz. 2181). W świetle tego Rozporządzenia, biomasę stanowi produkt składający się w całości lub części z substancji roślinnych, które pochodzą z rolnictwa, leśnictwa, a są spalane w celu odzyskania zawartej w nich energii. Jako biomasa traktowane są także odpady pochodzące z rolnictwa, leśnictwa, roślinne z przemysłu spożywczego.

Zgodnie z tymi przepisami także drewno jest uznawane jako biomasa, jednak odpady drewniane pokryte lub nasączone impregnatami lub środkami ochrony drewna nie stanowią już biomasy w rozumieniu zacytowanego Rozporządzenia. Za biomasę nie będzie uznawane drewno pełnowartościowe. Należy zasygnalizować,

że najczęściej stosowana do produkcji energii jest biomasa leśna, ale znaczenie biomasy rolniczej wzrasta znacznie. Przeszkodą jest formalna niemożliwość zagospodarowania popiołów pochodzących ze spalania biomasy.

Na szczególną uwagę jako potencjalne źródło popiołu zasługuje słoma. Sektor rolniczy w Polsce wytwarza 200–300 mln ton biomasy, w tym około 25 mln ton słomy [Bzdawka-Piątkowska 2007, Kwaśniewski 2008]. Średnio otrzymać można 740 tys. ton popiołu do zastosowania nawozowego w rolnictwie. Prawo polskie definiuje nawozy zapisem Ustawy z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz.U. Nr 147 poz. 1033) jako produkty przeznaczone do dostarczania roślinom składników pokarmowych lub zwiększenia żyzności gleb albo zwiększania żyzności stawów rybnych, w postaci nawozów mineralnych, nawozów naturalnych, nawozów organicznych oraz nawozów organiczno-mineralnych. Podstawowe parametry (w tym zawartość metali ciężkich) określające jakość nawozów zawarte są w Rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 21 grudnia 2009 r. w sprawie wykonywania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. z 2009 r. Nr 224 poz. 1804).

Nowelizacja dyrektyw w zakresie gospodarki odpadami, zaproponowana przez Komisję Europejską w ramach pakietu Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (*Circular Economy Package* tzw. CEP) stwarza wyjątkową szansę na zbudowanie w Polsce efektywnego systemu gospodarki odpadami [<http://ec.europa.eu/environment/circular-economy>].

FITOPIOŁY – PRODUKT UBOCZNY CZY ODPAD?

Podstawową regulacją określającą sposób postępowania z odpadami jest Ustawa z dnia 14.12.2012r. o odpadach, która weszła w życie w dniu 23.01.2013r. Ustawa ta znowelizowała ustawę z dnia 27.04.2001r. Potrzeba nowelizacji wynikała z obowiązku implementacji „Dyrektywy o Odpadach” do prawa krajowego.

Bardzo ważną zmianą zawartą w ustawie o odpadach, która może w istotny sposób oddziaływać na gospodarkę odpadami jest możliwość uznania przedmiotu lub substancji za produkt uboczny. Zgodnie z zapisami tej ustawy przedmiot lub substancja, powstająca w wyniku procesu produkcyjnego, którego podstawowym celem nie jest ich produkcja, mogą być uznane za produkt uboczny, niebędący odpadem, jeżeli są łącznie spełnione następujące warunki:

1. dalsze wykorzystywanie przedmiotu lub substancji jest pewne;
2. przedmiot lub substancja mogą być wykorzystywane bezpośrednio bez dalszego przetwarzania, innego niż normalna praktyka przemysłowa;
3. dany przedmiot lub substancja są produkowane jako integralna część procesu produkcyjnego;
4. dana substancja lub przedmiot spełniają wszystkie istotne wymagania, w tym prawne, w zakresie produktu, ochrony środowiska oraz życia i zdrowia ludzi, dla określonego wykorzystania tych substancji lub przedmiotów i wykorzystanie takie nie doprowadzi do ogólnych negatywnych oddziaływań na środowisko, życie lub zdrowie ludzi.

W myśl zapisu w punkcie 4, fitopopioły w czystym składzie nie stanowią tylko produktem ubocznym spalania lecz odpadem, który należy poddawać procesowi odzysku R10.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015r. w sprawie procesu odzysku R10 stypuluje: *Rozprowadzanie na powierzchni ziemi w celu nawożenia lub ulepszania gleby*. Akt ten został wydany na podstawie poprzednio obowiązującej ustawy. Zgodnie z treścią nowej ustawy o odpadach proces R10 otrzymał nowe brzmienie: *Obróbka na powierzchni ziemi przynosząca korzyści dla rolnictwa lub poprawę stanu środowiska*. Rozporządzenie określa warunki odzysku za pomocą procesu odzysku R10 i rodzaje odpadów dopuszczonych do takiego odzysku. W przypadku fito popiołów wyszczególniono dział IV. *Odpady mineralne* w których sklasyfikowano:

- popioły lotne z torfu i drewna niepoddanego obróbce chemicznej (10 01 03) oraz
- odpady pochodzące ze spalania słomy w kotłowniach zakładowych i gminnych (10 01 99).

Należy podkreślić, że treść zapisu „obróbka na powierzchni ziemi przynosząca korzyści dla rolnictwa lub poprawę stanu środowiska„ ogranicza więc stosowanie procesu R10 wyłącznie do obszaru rolniczego. Zastosowanie w obszarze leśnym wymagałoby więc udowodnienia, że nawożenie obszarów leśnych wpływa na poprawę stanu środowiska.

ROLNICZE I ŚRODOWISKOWE ZAGOSPODARWANIE FITOPOPIOŁÓW

Fitopopioły zastosowano już od 1935 we Finlandii jako środek poprawiający właściwości gleby szczególnie dla drzew iglastych rosnących na torfowiskach drenowanych (Hakkila 1989; Korpilahti i in. 1999). Badania nad przywróceniem stanowisk po wybieraniu torfu stosując fitopopioły w celu zmiany pH i odtworzenia różnorodności biologicznej są w toku. (Näsi i in. 2005). W Szwecji, fitopopioły były produkowane w dużych ilościach w elektrowniach lecz ich prace nad ich odzyskiem do leśnego zastosowania na gruntach torfowych oraz podzolach rozpoczęto już w latach 70-tych (Högbom i Nohrstedt 2001). Według Lundström i in. (2003), zmniejszenie zakwaszenia w glebach było efektywniejsze gdy zastosowano łącznie fitopopioły i wapno nawozowe. W przypadku Danii, popioły są produkowane ze współspalania słomy, drewna oraz odpadów zielonych. Doprowadziło to do powstawania popiołów o zróżnicowanym składzie chemicznym oraz o zawartości metali ciężkich jak i dioksyn nieraz w wysokich stężeniach. A w konsekwencji, 2500 ton popiołów jest rozprowadzone rocznie na składowiskach (Serup 1999; Møller i Ingerslev 2001).

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015r. w sprawie procesu odzysku R10 klasyfikuje popioły ze spalania biomasy (czyli fitopopioły) o kodzie 10 01 03 (*Popioły lotne z torfu i drewna niepoddanego obróbce chemicznej*) do odpadów mineralnych. Mogą jednak być stosowane pod łącznym spełnieniem następujących warunków:

- odpady są stosowane równomiernie na całej powierzchni gleby,
- odpady skruszonych skał zostały rozdrobnione tak, że odsiew na sicie o boku oczek kwadratowych 2 mm jest mniejszy niż 10%, a przesiew przez sito o boku oczek kwadratowych 0,5 mm jest nie mniejszy niż 50%,
- odpady są stosowane poza okresem wegetacji roślin,
- odpady przykrywa się glebą lub miesza z nią, z wyjątkiem ich stosowania na użytkach zielonych oraz plantacjach wieloletnich,
- rozpraszanie na powierzchni ziemi odbywa się tylko do głębokości 30 cm,
- odpady są stosowane na glebach, na których nie są przekroczone wartości dopuszczalne stężenia substancji określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016r. (Dz.U.2016.1395/1397 z dnia 2016.09.05) w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi,
- odpady są stosowane w taki sposób i w takiej ilości, aby ich wprowadzenie do gleby nie spowodowało przekroczenia w niej dopuszczalnych wartości metali ciężkich (Cr, Pb, Cd, Hg, Ni, Zn, Cu) określonych w załącznikach nr 2 i 3 do Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych, nawet przy długotrwałym stosowaniu,
- odpady spełniają wymagania dotyczące dopuszczalnych wartości zanieczyszczeń określonych dla nawozów wapniowych i wapniowo-magnezowych w Rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu,
- w celu określenia dawki odpadów możliwej do stosowania na glebach prowadzone są przez wytwórcę odpadów badania w laboratoriach posiadających certyfikat akredytacji lub certyfikat wdrożonego systemu jakości w rozumieniu Ustawy z dnia 30 sierpnia 2002r. o systemie oceny zgodności.

Z jednej strony, popioły są źródłem składników pokarmowych (Ca, K, P, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn) dla roślin, mają także właściwości odkwaszające, stanowią alternatywę dla nawozów mineralnych, natomiast z drugiej – zauważa się pewne niedogodności związane z zastosowaniem tych odpadów, a także zawartością w nich substancji szkodliwych (Tabela 1), takich jak metale ciężkie (Pb, Cd, As, Hg), (Wacławowicz 2011; ORRChim 2011; Maltas i Sinaj 2014; Demeyer et al. 2001 ; Hébert i Breton 2008).

Szczególnej kontroli wymagają fitopopioły uzyskane ze spalania roślin energetycznych nawożonych ściekami lub osadami ściekowymi (Przekopowska 2011). Istnieją przesłanki o znacznych korzyściach wynikających z pozyskania składników nawozowych z produktów odpadowych pochodzących ze spalania biomasy. *Błędem środowiskowym byłoby zatem kierowanie fitopopiołów na składowiska odpadów w sytuacji, gdy cenne składniki mogą być wykorzystane do nawożenia roślin i poprawy właściwości glebowych.*

Porównania między fitopopiołami, a handlowanymi nawozami takimi jak węgiel wapnia, mleczo wapniowe, sól potasowa dokonano w celu argumentowania możliwości rolniczego zastosowania fitopopiołów w Stanach Zjednoczonych (Naylor i Schmidt 1986; Campbell 1990; Someshwar 1996). Niemniej, w niektórych stanach fitopopioły są klasyfikowane jako niebezpieczne odpady, gdy wartość

pH w zawieszynie wodnej przekracza 12.5 (Washington). W przypadku Nowego Yorku, Maine oraz New Hampshire ich zastosowanie jest obwarowane różnymi restrykcjami.

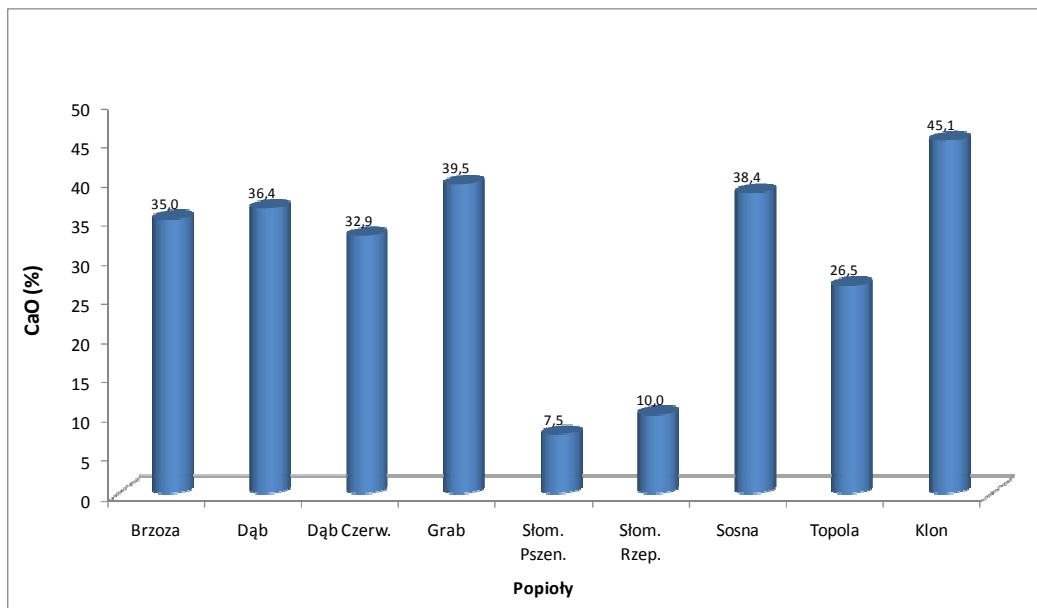
Tabela 1: Dopuszczalna maksymalna zawartość metali ciężkich oraz ich koncentracje w różnych fitopopiołach

Metal	Dopuszczalna maksymalna zawartość ¹	Elektrownia Enerbois (Szwajcaria) ²	Dopuszczalna maksymalna zawartość ³	Kowalski (2013) ⁴	Literatura ⁵
	mg/kg				
Cynk (Zn)	400	178	-	603	700 - 924
Miedź (Cu)	100	110	-	-	74 - 145
Nikiel (Ni)	30	52	60	22	12 - 47
Ołów (Pb)	120	21	140	159	< 22 - 130
Kadm (Cd)	1	< 0,6	50	5,0	3 - 12
Rtęć (Hg)	1	< 0,02	2	0,05	0,10

¹ ORRChim (2011); ²Maltas i Sinaj (2014); ³Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz.U. Nr 147 poz. 1033); ⁴Kowalski (2013); ⁵Demeyer et al. (2001), Hébert i Breton (2008)

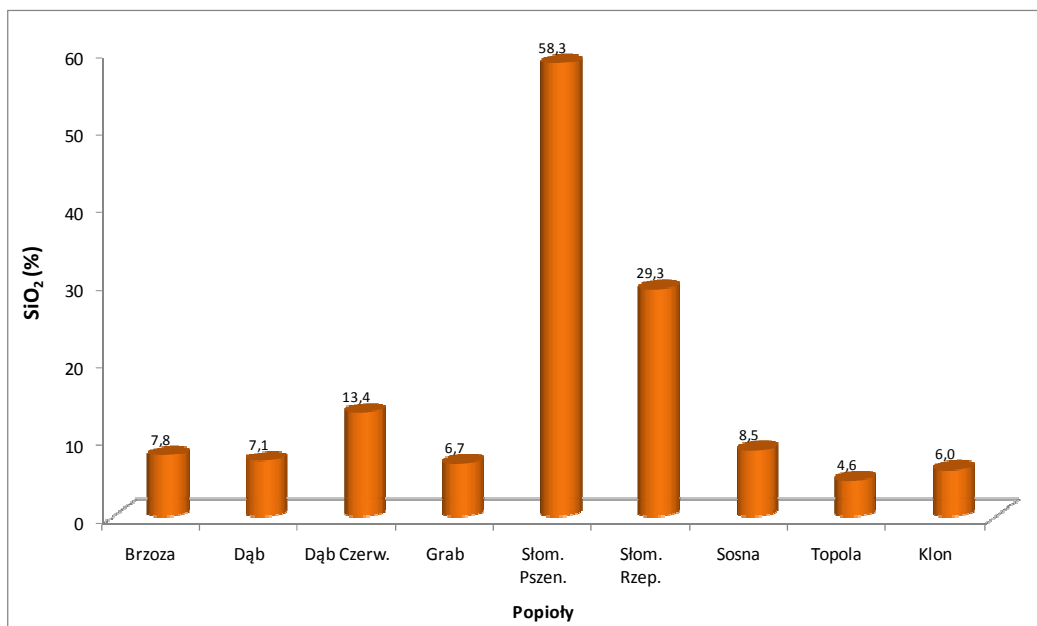
Jeden z podstawowych parametrów warunkujących stosowanie fitopopiołów dla celów agrochemicznych jak i remediacyjnych jest zawartość zarówno tlenku wapnia (CaO), (Ryc. 1) jak i krzemionki (SiO₂) (Ryc. 2). Tlenek wapnia spełnia dwa główne zadania w glebach: 1) regulowanie pH gleb kwaśnych i 2) dostarczanie wapnia (Ca) w celu poprawienia właściwości buforowych, czyli kompleksu sorpcyjnego, natomiast krzemionka wpływa na retencję wodną i ukształtowanie struktury krystalicznej gleb.

Zasadowość fitopopiołów lub ich równowartość neutralizująca (RN) jest oznaczona za pośrednictwem równowartości węglanu wapnia (CaCO₃) wyrażanej jako procent standardowej kredy pastewnej (CaCO₃), (przyjętej jako 100%). Według badań przeprowadzonych przez Vance (1996), wartości RN fitopopiołów mogą wahać się znacznie w zakresie 13,2–92,4%. Wyniki opublikowane przez Hakkila (1989) pokazały, że czyste fitopopioły drzewne wykazały wartości RN aż 115% (w porównaniu z CaCO₃), natomiast mieszanki z korą drzewną miały RN = 64%. Wychodzi na to, że popioły z kory mogą być przydatne w obniżeniu (regulowaniu) zasadowości fitopopiołów i zwiększyć atrakcyjność tych produktów.



Ryc. 1: Zawartość tlenku wapnia (CaO) w różnych fito popiołach
(Diatta, Grzebisz 2017)

Legenda: Brzoza; Dąb; Dąb Czerw. (Dąb czerwony); Grab; Słom. Pszen. (Słoma pszenna); Słom. Rzep. (Słoma rzepakowa); Sosna; Topola; Klon. Materiały drzewne były spalane w formie czyste drewno i kora.



Ryc. 2: Zawartość dwutlenku krzemu (krzemionki – SiO₂) w różnych fitopopiołach
(Diatta, Grzebisz 2017).

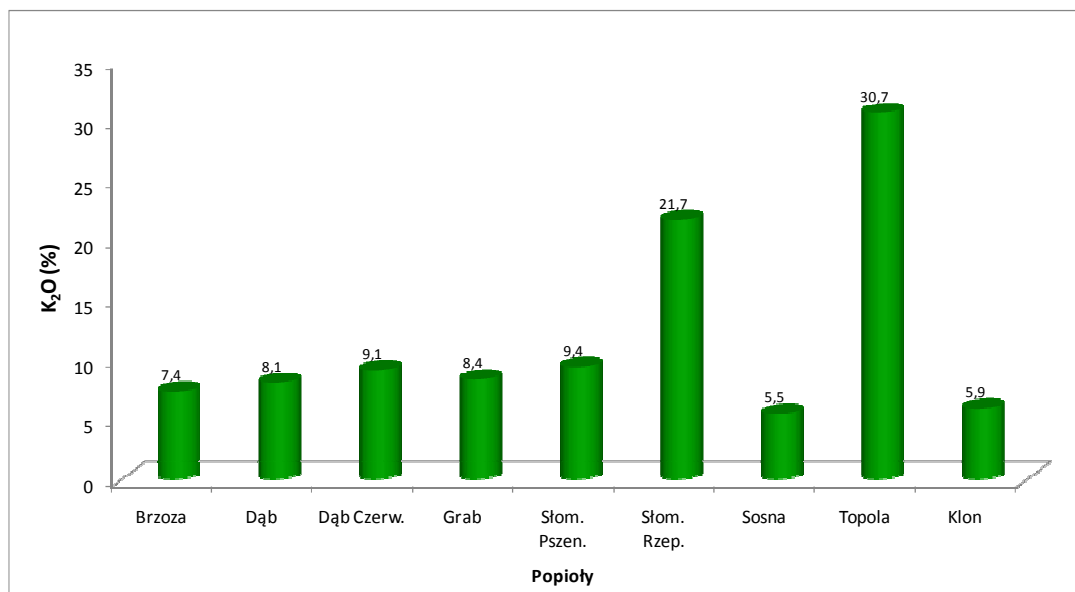
Legenda: Brzoza; Dąb; Dąb czerw (Dąb czerwony); Grab; Słom. Pszen. (Słoma pszenna); Słom. Rzep. (Słoma rzepakowa); Sosna; Topola; Klon. Materiały drzewne były spalane w formie czyste drewno i kora.

Efektywność wapnowania przy użyciu fitopopiołów jest funkcją reakcji zarówno tlenku wapnia (CaO), magnezu (MgO) i potasu (K₂O) oraz stopnia rozdrobnienia materiału (Meiwes 1995). Najbardziej zwięzłe porównanie wartości RN fitopopiołów z kredą pastewną pochodzą z badań prowadzonych na glebach w warunkach laboratoryjnych przez Naylor i Schmidt (1986). Z nich wynika, że po 60 dniach inkubacji gleb z fitopopiołami oraz kredą pastewną (CaCO₃), zmiany pH gleby były w 47–50% zgodne z równowartością kredy pastewnej i fitopopiołów. Bardzo silnie zakwaszone gleby, zwłaszcza na głębszych warstwach wymagają nieraz od 15 do 20 t ha⁻¹ tlenku wapnia (CaO) do osiągnięcia odpowiedniego poziomu Ca w glebie (Meiwes 1995), aczkolwiek, tak wysokich dawek rzadko się stosuje z uwagi na ujemne oddziaływanie zarówno na florę jak i faunę glebową.

Dawka wapnia zastosowana do gleb jest uzależniona od inicjalnej postaci fitopopiołów. Jednak, należy podkreślić, że postać sypka powoduje szybki przejściowy wzrost pH (Kahl i in. 1996). Aczkolwiek, wieloletnie doświadczenia polowe wskazały na utrzymujący się efekt poprawy pH, nawet po 5 - 6 latach po zastosowaniu fitopopiołów (Jacobson i in. 2004). Na szczególną uwagę zasługuje doniesienie Saarsalmi i in. (2001), którzy po zastosowaniu fitopopiołów w dawce 3 t ha⁻¹ oraz po pobraniu próbek sosny, świerku i gleby 16 lat później, zauważyli wzrost pH w gleb pod drzewostanem. Największy przerost pH o 0.6–1.0 (w stosunku do obiektu referencyjnego) zanotowano w próbkach gleb pobranych ze stanowisk wilgotniejszych. Warstwa mineralna (poniżej 0-10 cm głębokości) wykazała małe zmiany po 7-miu latach po zastosowaniu fitopopiołów, lecz po 16-tu latach, wzrost pH w niższej warstwie wskazuje na przemieszczenie czynników alkalizujących.

OPTIMALIZACJA W RECYKLINGU FITOPOPIOŁÓW

Straty czy wyniesienie składników odżywczych z obszarów leśnych oraz pól uprawnych bardzo wysokie. Drzewa pobrały i gromadziły przez długie lata składniki pokarmowe, przez to należy z powrotem je zwrócić tym ekosystemom leśnym. Badania przeprowadzone przez Federer i in. (1989) wykazały, że wycinać całych drzew we wschodniej części Stanów Zjednoczonych spowodowało wyniesienie z obszarów leśnych 20–60% Ca (czyli 28 – 84% CaO) oraz 2–10% K, P i Mg (czyli 2,2 – 12% K₂O; 4,4 – 22% P₂O₅ i 3,2 – 16,6% MgO przez okres 120 lat. Zawartość potasu, jako bezcennego pierwiastka odżywczego w różnych fitopopiołach przedstawiono na Ryc. 3. Te zawartości pokazują, że zawartość potasu w fito popiołach jest uzależniona od gatunku drzew. To samo dotyczy CaO oraz SiO₂, przedstawionych na Ryc. 1 i Ryc. 2.

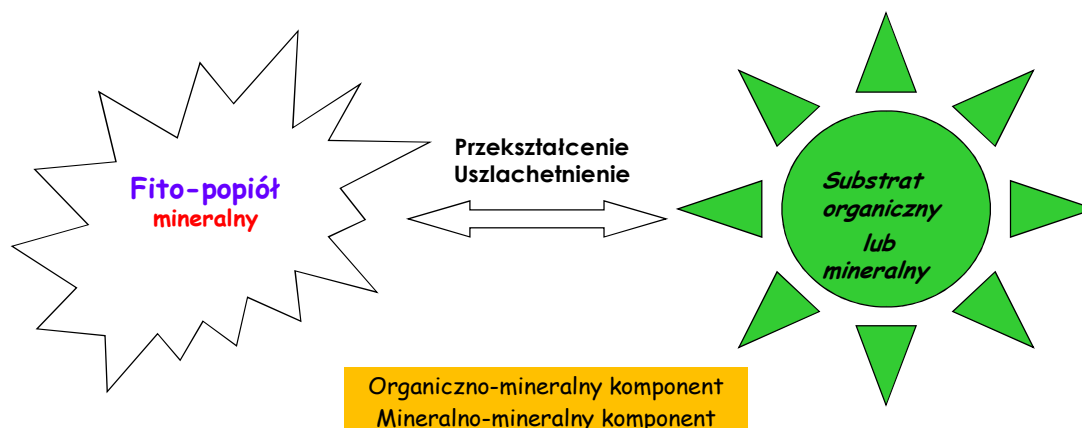


Ryc. 3: Zawartość tlenku potasu (K_2O) w różnych fitopopiołach
(Diatta, Grzebisz 2017).

Legenda: Brzoza; Dąb; Dąb czerw (Dąb czerwony); Grab; Słom. Pszen. (Słoma pszenna); Słom. Rzep. (Słoma rzepakowa); Sosna; Topola; Klon. Materiały drzewne były spalane w formie czyste drewno i kora.

Należy podkreślić fakt, że ekosystemy leśne nie są poddane częstym zabiegom nawożeniowym wraz z wapnowaniem, w odróżnieniu od pól uprawnych. Na tych ostatnich, wynoszenie jest większe, intensywniejsze bo w okresie krótszym niż rok a w dodatku, uzyskana biomasa roślin uprawnych jest bardzo duża w jednym cyklu wegetacyjnym. Więc zachodzi pilna potrzeba zwrócenia przyrodzie tego co człowiek „odebrał”. Jednak zastosowanie samych fitopopiołów jako nawozów/polepszaczy glebowych nie jest obecnie dozwolone, gdyż stanowią odpady, które należy poddać recyklingowi (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015r. w sprawie procesu odzysku R10, poz. 132). Jedną z koncepcji przedstawiono na Ryc. 4.

Jak ustalić równowagę? Efektywnie i ekologicznie przyjazną!



Ryc. 4: *Koncepcja tworzenia polepszaczy glebowych lub innych komponentów mineralnych na bazie fitopopiołów (Diatta, Kowalski 2017).*

Postać utworzonych polepszaczy zarówno mineralnych czy organiczno-mineralnych na bazie fitopopiołów odgrywa kluczową rolę co do kontrolowania procesu i tempa uwalniania składników w glebach. Granulowane polepszacze są łatwiej rozsiewane, lecz uwalnianie pierwiastków wolniejsze. Zmniejsza to ryzyko gwałtownego wzrostu alkaliczności, zwłaszcza w naturalnych ekosystemach. Więc, przetworzenie fitopopiołów według koncepcji na Ryc. 4 jest najbardziej wskazanym kierunkiem działań recyklingowych, a ich efektem może być znaczne obniżenie pH polepszaczy organiczno-mineralnych od 2 do 3,5 jednostki (Tabela 2)

Według Vance (1996), jednorazowe zastosowanie fitopopiołów w dawce $10t\ ha^{-1}$ może uzupełnić ilości składników pokarmowych wyniesionych z obszarów leśnych wraz z pozyskiwaniem drewna. Jednak należy wnieść także azot (N) wraz z nawozami w celu utworzenia pewnej równowagi żywieniowej. Zastosowanie fitopopiołów wywiera generalnie słaby wpływ na dostępność N, z uwagi na jego niski poziom w surowym materiale drzewiastym ($<0.1\%$). Aczkolwiek, dostępność N wrasta często pośrednio jako wynik stosowania fitopopiołów ze względu na wzrost pH a w konsekwencji doprowadza do mineralizacji organicznych połączeń azotu glebowego. Dane zamieszczone w Tabeli 3, zdecydowanie pokazują na pozytywny efekt wprowadzenia fitopopiołów do gleby. Warunkuje dostarczeniem łatwo rozpuszczalnego wapnia (Ca), który tą drogą jako CaO reguluje odczyn gleb kwaśnych (Tabela 2). Z drugiej strony, wzrasta także buforowość gleby (Tabela 3). Jest to cecha podstawowa oraz wyznacznik jakości i produktywności gleby. Należy wskazać na rolę zarówno fitopopiołu jak i pofermentu w kształtowaniu w/w buforowości gleb, której wartości są wyższe w przypadku obiektów z fitopopioły. W przypadku zastosowania polepszaczy [1:1], dawka $40\ t\ ha^{-1}$ dała podobny efekt, który się mieści między dawkami 10 a 20 t

ha⁻¹ fitopopiołów. Było to spowodowane działaniem „regulującym” materii organicznej, czyli pofermentu. Jest to kierunek, który należy zdecydowanie wspierać w procesie recyklingu fitopopiołów.

Tabela 2. Zmiany pH polepszaczy organiczno-mineralnych [1:1] utworzonych na bazie fitopopiołów i pofermentu (Diatta, 2016)

Materiał/Fito-popiół	Inicjalne pH fito-popiołów	Stosunek Fito-popiół: Poferment	Końcowe pH polepszacza [1:1]
Poferment	-	-	7,8
Brzoza	13.2	1+1	10,1
Dąb	12.9	1+1	10.0
Dąb czerwony	13.4	1+1	10.0
Grab	13.6	1+1	10,3
Słoma rzepakowa	12.6	1+1	10,4
Słoma pszenna	11.5	1+1	9,6
Sosna	13.4	1+1	9,7
Topola	13.6	1+1	10,5
Klon	13.2	1+1	10.8

Tabela 3. Wpływ fitopopiołów i polepszaczy [1:1] na buforowość gleb (Diatta, 2016)

Fito-popiół	Dawki fito-popiołów (t ha ⁻¹)				Dawki polepszaczy [1:1]. (t ha ⁻¹)			
	5	10	20	40	5	10	20	40
[Buforowość – cmol ₍₊₎ kg ⁻¹]								
Brzoza	15.9	20.1	21.6	25.0	13.2	14.6	15.8	20.1
Dąb	17.5	20.9	20.9	21.5	16.6	17.3	17.4	17.9
Dąb czerwony	14.2	16.2	18.9	20.7	13.9	14.8	16.2	16.9
Grab	15.2	16.2	18.3	23.2	14.6	15.2	15.3	18.0
Słoma rzepakowa	15.2	15.3	16.5	17.5	12.8	13.4	14.9	16.0
Słoma pszenna	14.5	15.9	16.5	17.6	12.1	14.7	16.0	16.6
Sosna	15.8	18.5	19.3	23.2	14.7	16.2	16.8	18.8
Topola	16.2	16.7	18.8	21.7	16.2	16.3	16.7	19.4
Klon	16.4	18.4	20.0	22.2	16.1	17.4	19.6	21.2

Buforowość gleby kontrolnej (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	9.6	Rates			
Dawki pofermentu [t ha ⁻¹]	-	5	10	20	40
Buforowość gleb (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	-	11.9	12.7	14.4	15.9

WNIOSKI

1. Obowiązujące krajowe regulacje prawne dopuszczają zastosowanie popiołów lotnych o kodzie 10 01 03 do odzysku w procesie R10. Analiza składu chemicznego 9 próbek fitopopiołów wykazała, że podstawowym składnikiem jest tlenek wapnia (CaO) za wyjątkiem popiołów ze słomy pszennej i rzepakowej, gdzie krzemionka (SiO₂) dominuje.
2. Wykorzystanie popiołów o kodzie 10 01 03 w kierunku rolniczym lub leśnym możliwe jest tylko poprzez przetwarzanie tych fitopopiołów w instalacjach lub urządzeniach spełniających odpowiednie warunki określone w ustawie o odpadach. Z uwagi na „wartość nawozową” fitopopioły powinny być przeznaczone do zagospodarowania w kierunkach rolniczym, leśnym lub do celów rekultywacji.
3. Przeprowadzone badania potwierdziły korzystne oddziaływanie fitopopiołów na odczyn (pH) oraz znaczną poprawę buforowości gleby. Ponadto, w celu zapobiegania gwałtownemu wzrostu pH w ekosystemach naturalnych, fitopopioły do powinny być granulowane.
4. Właściwe zagospodarowanie fitopopiołów wymaga przeprowadzenia odpowiedniego programu badawczego, który w swoich założeniach powinien zawierać także elementy kampanii przedstawiającej społeczeństwu i administracji ich korzystne oddziaływanie i brak negatywnego wpływu na życie, zdrowie ludzi i zwierząt oraz środowisko naturalne.

REFERENCJE

1. Bzdawka-Piątkowska K. (2007): Stan obecny i perspektywy rozwoju energetyki odnawialnej w Polsce. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 33:20–26.
2. Campbell A.G. (1990): Recycling and disposing of wood ash. *Tappi J.* 73(9):141–146.
3. Circular Economy Package (CEP): <http://ec.europa.eu/environment/circular-economy>
4. Demeyer A., Voundi Nkana J. C. and Verloo M. G., (2001): Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource Technology* 77: 287–295.
5. Federer C., Hornbeck L., Tritton L., Martin C., Pierce R. and Smith C. (1989): Long term depletion of calcium and other nutrients in eastern US forests. *Environ. Manage.* 13, 593–601.
6. Fijałkowska D., Styszko L. (2011): Ciepło spalania i wartość opałowa biomasy wierzby z różnej liczby lat odrastania pędów. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 564: 65–72.
7. Greene T.W. (1988): *Wood Ash Disposal and Recycling Source Book*. Northeast Regional Biomass program, Coalition of NE Governors. OMNI Environmental Services, Washington, DC.
8. Hakkila P. (1989): *Utilisation of Residual Forest Biomass*. Springer series in Wood Science, Springer Verlag, Berlin, 568 pp.
9. Hébert M. and Breton B., (2008): *Recyclage agricole des cendres de bois au Québec*. Etat de la situation, impacts et bonnes pratiques agroenvironnementales. *Agrosolutions*. 19:18–33.
10. Högbom L. and Nohrstedt H.-Ö. (2001): ¹³⁷Cs in different conifer forest compartments following wood ash addition. *SkogForsk Report No. 2*, pp. 17–18.

11. Jacobson S., Högbom L., Ring E. and Nohrstedt H.-Ö. (2004): Effects of wood ash dose and formulation on soil chemistry at two coniferous forest sites. *Water Air Soil Pollut.* 158, 113–125.
12. Kahl J., Fernandez I., Rustad L. and Peckenham J. (1996): Threshold application rates of wood ash to an acidic forest soil. *J. Environ. Qual.* 25, 220–227.
13. Korpilahti A., Moilanen M. and Finér L. (1999): Wood ash recycling and environmental impacts – State-of-the-art in Finland. In 'Developing Systems for Integrating Bioenergy into Environmentally Sustainable Forestry'. A.T. Lowe and C.T. Smith (compilers). Proceedings of the IEA Bioenergy workshop, EU Joule III programme T18. Rotorua, New Zealand, 82–89.
14. Kowalski M. (2013): Popioły ze spalania biomasy. Wytwarzanie, charakterystyka oraz możliwości gospodarczego wykorzystania w sektorze rolnym i leśnym w świetle Ustawy z dnia 14.12.2012 r. o odpadach oraz innych regulacji, na przykładzie popiołów ze spalania biomasy wytwarzanych w PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A. Oddział Zespół Elektrowni Dolna Odra, Elektrownia Szczecin. Studia podyplomowe „Zagospodarowanie ubocznych produktów spalania”. Praca dyplomowa. Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, 58 str.
15. Kwaśniewski D. (2008): Ocena produkcji i potencjalnych możliwości wykorzystania słomy do celów grzewczych na przykładzie powiatu żywieckiego. *Inżynieria Rolnicza* 6: 113–119.
16. Lundström U.S., Bain D.C., Taylor A.F.S. and van Hees P.A.W. (2003): Effects of acidification and its mitigation with lime and wood ash on forest soil processes: a review. *Water Air Soil Pollut. Focus* 3:5–28.
17. Maltas A. et Sinaj S. (2014): Les cendres de bois: un nouvel engrais pour l'agriculture suisse. *Recherche Agronomique Suisse* 5 (6): 232–239
18. Meiwes K.J. (1995): Application of lime and wood ash to decrease acidification of forest soils. *Water Air Soil Pollut.* 85, 143–152.
19. Møller I. and Ingerslev M. (2001): The need for and effects of wood-ash application in Danish forests. *SkogForsk Report No. 2*, pp. 6–8.
20. Naylor L. and Schmidt E. (1986): Agricultural use of wood ash as a fertiliser and liming material. *Tappi J.* 69:114–119.
21. Näsi N., Kubin E. and Tillman-Sutela E. (2005): Re-vegetation of a cut-away peatland is accelerated by ash fertilisation: In ReCash Seminar Proceedings, Regular Recycling of Wood Ash to Prevent Waste Production: ReCash – A Life Environment Demonstration Project. J. Pechova and J. Karas (eds). Lesy České Republiky s.p. (Forests of the Czech Republic SE.) EU Life Project, Prague, pp. 42–47.
22. ORRChim (2011). Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim). 18 mai 2005 (état le 1er juillet 2011), RS.814.81.
23. Pitman R.M. (2006): Wood ash use in forestry – a review of the environmental impacts.
24. Przekopowska M. (2011): Zagospodarowanie produktów ubocznych spalania biomasy. Seminarium 23 listopada 2011, Warszawa. Źródło: <http://spalaniebiomasy.pl/pl/inne-wydarzenia/52-seminarium-zagospodarowanie-produktow-ubocznych-spalania-biomasy.html>
25. Saarsalmi A., Mälkönen E. and Piirainen S. (2001): Effects of wood ash fertilisation on forest soil chemical properties. *Silva Fenn.* 35, 355–367.
26. Serup, H. (ed.). (1999): Wood for Energy Production – Technology – Environment – Economy. Sect. 6: Theory of Wood Firing. The Centre for biomass technology, Copenhagen: Danish Energy Agency, pp. 30–32
27. Someshwar A. (1996): Wood and combination wood-fired boiler ash characterisation. *J. Environ. Qual.* 25:962–972.

28. Stankowski Sł., Maciorowski R. (2011): Popioły z biomasy jako potencjalne źródło składników pokarmowych dla roślin. Seminarium „Zagospodarowanie ubocznych produktów spalania” Materiały konferencyjne s. 160 – 180, Warszawa.
29. Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyżaniak M. 2013b. Cost of heat energy generation from willow biomass. *Renewable Energy* 59:100–104.
30. Styszko L., Fijałkowska D., Sztyma M., Ignatowicz M. (2010): Wpływ warunków uprawy na pozyskanie biomasy wierzby energetycznej w czteroletnim cyklu. *Rocz. Ochr. Środ./Annual Set Environ. Prot.* 12: 575–586.
31. Vance E.D. (1996): Land application of wood-fired and combination ashes: an overview. *J. Environ. Qual.* 25, 937–944.
32. Vassilev S, Baxter D., Andersen L. and Vassileva C., (2013a): An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. *Fuel* 105:40-76.
33. Vassilev S, Baxter D., Andersen L. & Vassileva C., (2013b): An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilization, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel* 105 :19-39.
34. Waclawowicz R. (2011): Rolnicze wykorzystanie popiołów ze spalania biomasy. Seminarium Zagospodarowanie ubocznych produktów spalania biomasy, Warszawa, s. 181–206.
35. Xiao R., Chen X., Wang F., Yu G. (2011): The physicochemical properties of different biomass ashes at different ashing temperature. *Renewable Energy* 36: 244–249

Ustawy i Rozporządzenia

1. Raport GUS (2014): Energia ze źródeł odnawialnych w 2013 r. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa, 72 s.
2. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2005 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji (Dz.U. Nr 260 poz. 2181)
3. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 21 grudnia 2009 r. w sprawie wykonywania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. z 2009 r. Nr 224 poz. 1804)
4. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10 (poz. 132)
5. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi (Dz.U.2016.1395 z dnia 2016.09.05)
6. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016r. w sprawie rejestru historycznych zanieczyszczeń powierzchni ziemi (Dz.U.2016.1397 z dnia 2016.09.05).
7. Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz.U. Nr 147 poz. 1033)

ASHES FROM COMBUSTION OF PLANT BIOMASS (PHYTOASHES) – RECYCLING AND AGRO-CHEMICAL POTENTIAL

ABSTRACT

The national legal regulations in force allow the use of fly phyto-ashes designated by the code 10 01 03 for recycling according to the R10 process. Their use for agriculture and silviculture should be possible only after proper transformation in equipments fulfilling conditions reported in the Act of Law on wastes. Data listed in the current paper decidedly point out at the positive effect of incorporating phyto-ashes into the soils. This process may potentially regulate the concentrations of soluble calcium (Ca) which in turn, as CaO, shapes and controls the pH of acid soils. Next, the high concentrations of Ca leads to raising the soil buffering capacity responsible for stabilizing quite all geochemical reactions. Then this becomes the prime element and reference of soil quality as well as its productivity.

The role of phyto-ashes and digestate in shaping buffer properties of soils was pointed out. The applications of sole phyto-ashes, has led to generally highest buffering values than for the treatments receiving the components [1:1, phyto-ash:digestate]. Then, the rate 40 t ha⁻¹ of the components [1:1, phyto-ash:digestate] produced similar effect as did the phyto-ash rates between 10 and 20 t ha⁻¹. Digestate was the main organic matter “regulator” for the reactive ashes. With respect to their “fertilizing value”, phyto-ashes should be managed for agricultural, silvicultural and remediation tasks. The incorporation of organic additives makes the highly reactive phyto-ashes much more eco-friendly, that is safe for the environment.
