

**Marta WÓJCIK, Feliks STACHOWICZ**

Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza

## **PRZYDATNOŚĆ POPIOŁÓW ZE SPALANIA BIOMASY W PRAKTYCE ROLNICZEJ**

### **Streszczenie**

Biomasa pochodząca z produkcji rolniczej, np. słoma zbóż, znajduje coraz częściej zastosowanie w energetyce zawodowej. Termiczna konwersja biomasy skutkuje powstawaniem ubocznych produktów spalania: popiołów lotnych oraz popiołów dennych, które z uwagi na fizykochemiczną charakterystykę stwarzają problem z właściwym unieszkodliwianiem. Ze względu na właściwości nawozowe, odpady powstające podczas spalania biomasy mogą wykazywać przydatność w zabiegach rolniczych jako substytut lub składnik nawozów mineralnych. Opracowanie zawiera studium literatury dotyczącej wpływu popiołów ze spalania biomasy roślinnej na właściwości fizykochemiczne gleb oraz plonowanie roślin. W artykule zamieszczono również wyniki badań własnych dotyczących składu chemicznego ubocznych produktów spalania biomasy. Doniesienia literatury wskazują na wysoką skuteczność działania popiołu ze spalania biomasy na proces wegetacji roślin w porównaniu do innych nawozów mineralnych. Pozytywny wpływ popiołu na produkcję rolniczą, przy stosunkowo niskim poziomie zagrożenia dla środowiska (metale ciężkie) powoduje, że uboczne produkty spalania biomasy można rozważać jako tani i skuteczny nawóz o charakterze zasadowym. Nawóz ten może być również stosowany na Pogórze Dynowskim. Ekonomiczne aspekty stosowania popiołu w celach rolniczych mogą w przyszłości przyczynić się do stopniowego ograniczenia zużycia nawozów mineralnych na korzyść stosowania ubocznych produktów spalania biomasy.

**Słowa kluczowe:** popioły ze spalania biomasy, nawozy, plonowanie roślin, rolnictwo

## **THE USEFULNESS OF BIOMASS ASHES IN AGRICULTURAL PRACTICES**

### **Summary**

Agricultural biomass, for example straw, is applied in an energy sector more often. The thermal conversion of biomass results in the production of combustion by-products: fly and bottom ashes. Specific physical and chemical properties of ashes cause a problem with their proper utilization. Due to the fertilizing properties of biomass ashes, they might be used in agricultural practices as a substitute or a component of mineral fertilizers. This paper presents the literature review concerning the influence of biomass ashes on charac-

teristics of soil and the plant yield. An own research concerning the chemical characteristic of biomass ashes was also presented. The literature confirms the high efficiency of biomass ashes in a vegetation process in comparison to other mineral fertilizers. The positive impact of biomass ashes on an agricultural production, as well as the low concentration of heavy metals, causes that the biomass combustion by-products can be considered as an inexpensive and effective alkaline fertilizer. This fertilizer might be also used in Dynów Foothills. The economic aspects might contribute to the progressive reduction of the consumption of mineral fertilizers in favor of the use of biomass ashes in the future.

**Keywords:** biomass ashes, fertilizers, crop yield, agriculture

## 1. Wprowadzenie

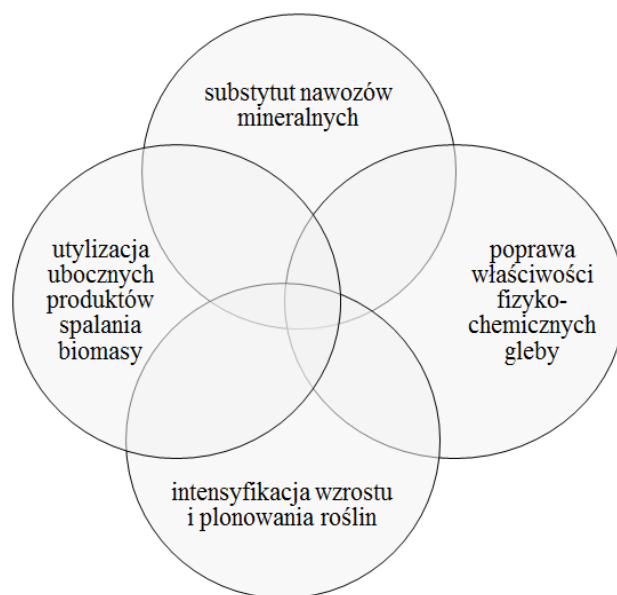
Zwiększone zapotrzebowanie na paliwa kopalne, przy ich ograniczonych zasobach, stwarza potrzebę poszukiwania nowych surowców o potencjalnym przeznaczeniu w sektorze energetycznym. Aspekt ten jest szczególnie istotny wobec prognoz maksymalnego wydobycia ropy naftowej w latach 2015–2020 [Schleicher 2005, s. 65]. Doniesienia literatury wskazują, że przy dotychczasowym sposobie eksploatacji światowe zasoby ropy naftowej wystarczą na około 40 lat, natomiast węgla – na około 200 lat [Gizińska, Józwiakowski 2015, s. 280–285]. Jedną z głównych strategii polityki energetycznej państwa jest możliwie największa produkcja energii końcowej ze źródeł odnawialnych. Położenie hydrogeograficzne Polski uniemożliwia uzyskanie znacznego udziału energii odnawialnej ze słońca, wiatru oraz źródeł geotermalnych, w związku z czym alternatywne rozwiązanie stanowi biomasa pozyskiwana z rolnictwa, leśnictwa oraz przemysłu drzewnego [Meller, Bilenda 2012, s. 287–292].

W Polsce z 1 ha użytków rolnych uzyskuje się około 10 ton biomasy, co stanowi równoważność 5 ton węgla kamiennego [<http://www.instsani.pl/427/charakterystyka-biomasy>, dostęp: 21.06.2018]. Niskie koszty pozyskiwania oraz praktycznie zerowa emisja dwutlenku węgla podczas spalania powodują, że biomasa stanowi obecnie trzecie co do wielkości, alternatywne źródło energii na świecie. Dodatkowo, ogrzewanie budynków z zastosowaniem kotłów na biomasę jest o około 50–70% tańsze w stosunku do spalania węgla, w związku z czym biomasa jest nazywana „paliwem przyszłości” [<http://www.instsani.pl/427/charakterystyka-biomasy>, dostęp: 21.06.2018]. Dotychczas w celach energetycznych stosowano wyłącznie biomasę leśną lub uzyskiwaną z zakładów drzewnych, jednak w ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania biomasą pochodzącą z produkcji rolniczej. Coraz częściej w energetyce zawodowej stosuje się również słomę zbóż, rzepaku oraz rośliny energetyczne, m.in. wierzbę czy miskantę, których zbiory w Polsce szacuje się na około 25 mln ton rocznie [Kwaśniewski 2008, s. 113–119].

Ubocznymi produktami termicznej konwersji biomasy są popioły lotne oraz denne, które zgodnie z polskim prawodawstwem muszą zostać poddane proce-

som unieszkodliwiania. W 2012 r. w Polsce wytworzono około 42,3 tys. ton popiołów z biomasy, z czego tylko około 29% poddano odzyskowi [<http://www.kierunekenergetyka.pl/magazyn,popioły-z-biomasy.html>, dostęp: 21.06.2018]. Specyficzne właściwości ubocznych produktów spalania biomasy, m.in. wysokie straty prażenia oraz zawartość alkalicznych związków, uniemożliwiają komercyjne zastosowanie popiołów w sektorze budowlanym, w związku z czym są poszukiwane nowe metody ich finalnego zagospodarowania [Wójcik, Stachowicz i wsp. 2017b, s. 377–393].

Ze względu na właściwości nawozowe, składowanie ubocznych produktów spalania biomasy może się okazać marnotrawieniem cennych substancji odżywczych dla roślin. Popioły ze spalania biomasy są bogatym źródłem składników pokarmowych, mają właściwości odkwaszające i mogą stanowić substytut dla powszechnie stosowanych nawozów (ryc. 1). Należy jednak zaznaczyć, że popioły z biomasy stosowane w celach rolniczych muszą spełniać wymagania dotyczące dopuszczalnych zawartości metali i substancji toksycznych, określonych w ustawie z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz.U. z 2007 r. Nr 147, poz. 1033) [<http://isap.sejm.gov.pl/>, dostęp: 21.06.2018] oraz w Rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (tab. 1.) (Dz. U. z 2008 r. Nr 119, poz. 765) [<http://isap.sejm.gov.pl/>, dostęp: 21.06.2018].



Ryc. 1. Zalety zastosowania popiołów w rolnictwie

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 1. Dopuszczalne zawartości metali w nawozach mineralnych, w tym popiołach ze spalania biomasy

Metal	Pb	Cd	As	Hg
Stężenie [mg/kg]	140	50	50	2

Źródło: <http://isap.sejm.gov.pl/>, dostęp: 21.06.2018

Prezentowany artykuł zawiera studium literatury dotyczącej właściwości nawozowych popiołów ze spalania biomasy. Zwrócono uwagę na wpływ ubocznych produktów spalania biomasy na wzrost i plonowanie roślin oraz na poprawę właściwości fizykochemicznych gleb. Pozytywne oddziaływanie na produkcję rolniczą, przy stosunkowo niskim poziomie zagrożenia dla środowiska, powoduje, że popioły ze spalania biomasy można rozważać jako tani i skuteczny nawóz o charakterze zasadowym [Nieżgoda 2015, s. 3]. Wspomniane popioły mogą być również stosowane w celach nawozowych na obszarach rolniczych oraz na terenach łąk i pastwisk na Pogórzu Dynowskim.

## 2. Charakterystyka popiołów ze spalania biomasy

Potrzeba wytwarzania „czystszej energii” wiąże się z coraz większą popularnością alternatywnych źródeł energii, wśród których szczególne znaczenie zyskuje biomasa. Skład chemiczny biomasy to przede wszystkim substancje wchodzące w skład komórek: białka, cukry, tłuszcze oraz materiał strukturalny – spolimeryzowane cukry, ligniny i celuloza [[http://www.pzits.not.pl/docs/ksiazki/Pol\\_%202012/Czech%2073-82.pdf](http://www.pzits.not.pl/docs/ksiazki/Pol_%202012/Czech%2073-82.pdf)., dostęp: 21.06.2018]. Zaletą spalania biomasy jest również niska emisja dwutlenku węgla [<http://www.kierunek-energetyka.pl/magazyn,popioły-z-biomasy.html>, dostęp: 21.06.2018]. Problemem pozostaje jednak emisja gazów związanych z niedoborem tlenu w procesie spalania oraz powstawanie ubocznych produktów, tj. popiołów lotnych i dennych [[http://www.pzits.not.pl/docs/ksiazki/Pol\\_%202012/Czech%2073-82.pdf](http://www.pzits.not.pl/docs/ksiazki/Pol_%202012/Czech%2073-82.pdf)., dostęp: 21.06.2018].

Popioły powstające podczas termicznego przekształcania biomasy charakteryzują się zróżnicowaną wilgotnością oraz zawartością popiołu. W porównaniu z innymi surowcami kopalnymi, podczas spalania biomasy powstaje ponad 10-krotnie mniej popiołu. [Ściążko i wsp. 2006, s. 207–220] podają, że zawartość popiołu w zrębkach sosnowych, zrębkach bukowych oraz wierzbie wynosi odpowiednio: 0,3; 0,8 oraz 2,2%. [Wilk 2006, s. 345] szacuje ilość popiołu dla biomasy drzewnej na poziomie 0,3–7,4%, a dla słomy zbóż w granicach 4,3–10,4%. Według Niedziołki i Zuchniarza [2006, s. 232–237] podczas spalania biomasy powstaje niewielka ilość popiołu, rzędu 0,5–12,5% – w zależności od gatunku rośliny, z kolei większa ilość świadczy o zanieczyszczeniu surowca. Dla

porównania, zawartość popiołu dla węgla kamiennego wynosi 22,2% [Ściążko i wsp. 2006, s. 207–220].

Popioły ze spalania biomasy, ze względu na zawartość substancji pokarmowych, są cennym źródłem pierwiastków niezbędnych do prawidłowego rozwoju roślin. Skład chemiczny ubocznych produktów spalania biomasy zależy przede wszystkim od rodzaju spalanego paliwa oraz konstrukcji kotła [Wójcik, Stachowicz i wsp. 2017b, s. 377–393]. Popioły z biomasy roślinnej charakteryzują się obecnością:  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$ ,  $CaO$  oraz  $SO_3$  oraz prawie zupełnym brakiem azotu i substancji organicznych [Uliasz-Bocheńczuk i wsp. 2016, s. 149–162]. Badania przeprowadzone przez Czecha i współpracowników [[http://www.pzits.not.pl/docs/ksiazki/Pol\\_%202012/Czech%2073-82.pdf](http://www.pzits.not.pl/docs/ksiazki/Pol_%202012/Czech%2073-82.pdf)., dostęp: 21.06.2018] wykazały, że uboczne produkty spalania biomasy mogą zawierać więcej: Ag, Au, B, Be, Cr, Mn, Na, Ni, Rb, Se i Zn oraz mniej: Al i Si, w stosunku do ubocznych produktów spalania węgla. Dla popiołów z biomasy drzewnej jest charakterystyczna również wysoka zawartość chloru i siarki [Uliasz-Bocheńczuk i wsp. 2016, s. 149–162]. Sporadycznie w popiołach mogą również występować podwyższone stężenia metali ciężkich w formach słabo rozpuszczalnych w wodzie. Skład chemiczny popiołów ze spalania wybranej biomasy roślinnej został oznaczony przez Wójcik i wsp. [2017b, s. 1–8] w ramach badań dotyczących wpływu popiołów z biomasy na proces kondycjonowania osadów ściekowych (tab. 2.).

Tabela 2. Skład chemiczny wybranych popiołów ze spalania biomasy

Pierwiastek	Zawartość składnika według rodzaju popiołu [mg/g]		
	popiół ze słomy pszenicznej	popiół z drewna bukowego	popiół z wierzby energetycznej
wapń (Ca)	13,86	205,57	288,80
potas (K)	11,67	122,56	170,05
magnez (Mg)	9,85	24,24	23,82
żelazo (Fe)	25,31	27,44	11,42
mangan (Mn)	9,27	23,72	4,54
krzem (Si)	37,65	11,71	5,19
fosfor (P)	9,75	6,88	39,39
siarka (S)	3,51	4,88	4,49
glin (Al)	14,26	3,34	3,01
bar (Ba)	0,52	2,33	0,44
stront (Sr)	0,11	1,21	0,84
chlor (Cl)	0,40	1,33	1,45
miedź (Cu)	0,06	-	-
cynk (Zn)	2,40	0,53	0,29
jod (I)	0,80	-	-

Źródło: Badania własne

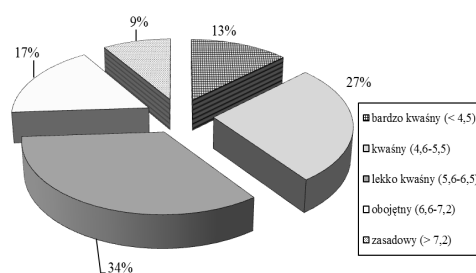
Analiza uzyskanych wyników wykazała, że w badanych popiołach dominował przede wszystkim wapń oraz potas. Niższa koncentracja metali cięż-

kich w popiołach ze spalania biomasy, w stosunku do odpadów z termicznego przekształcania węgla pozwala na ich rolnicze wykorzystanie w celach nawozowych i przy umiejętnym stosowaniu nie stanowi zagrożenia dla środowiska [Zapałowska 2015, s. 1–94].

Popioły ze spalania biomasy są naturalnym i najstarszym nawozem mineralnym, dostarczającym niezbędne substancje pokarmowe dla roślin. Warunkuje to możliwość ich stosowania jako alternatywy dla popularnych nawozów rolniczych, również na Pogórzu Dynowskim. Dane zawarte w *Roczniku Statystycznym Rolnictwa* [www.stat.gov.pl, dostęp: 21.06.2018] podają, że większość gleb w Polsce charakteryzuje się wartością pH < 6,5 (ryc. 2.).

W celu osiągnięcia wysokich plonów i wspomaganie wzrostu roślin są stosowane są nawozy mineralne. W 2014 r. w Polsce na 1 ha użytków rolnych zastosowano 132,9 kg wieloskładnikowego nawozu zawierającego azot, fosfor i potas (tzw. nawóz NPK) oraz około 47,9 kg CaO [www.stat.gov.pl, dostęp: 21.06.2018]. Według Niezgody [2015, s. 3–18] w latach 2010–2011 odnotowano o ponad 13% większy popyt na nawozy mineralne w stosunku do lat 1999–2000. Zanotowano również 40% wzrost zużycia nawozów azotowych, co wpływa niekorzystnie na funkcjonowanie biosfery. Nadmierne ilości azotu wprowadzane wraz z nawozami do środowiska przyczyniają się do zjawiska eutrofizacji oraz tzw. przesuszania gleb [Niezgoda 2015, s. 3–18].

Koszty nawożenia stanowią jeden z największych wydatków w produkcji rolniczej. Według Czekaja [2012, s. 39–44] w 2009 r. w Małopolsce na zakup nawozów w statystycznym gospodarstwie objętym systemem zbierania danych rachunkowych z gospodarstw rolnych FADN (ang. *Farm Accountancy Data Network*) przeznaczono około 6316 zł w przypadku upraw polowych oraz 6755 zł w przypadku upraw ogrodniczych. Rolnicze zastosowanie popiołów determinuje zarówno ich finalne zagospodarowanie, jak i zapewnia rolnikom możliwość obniżenia kosztów nawożenia poprzez wykorzystanie plonotwórczych właściwości popiołów. Jest to zatem korzystne rozwiązanie dla rolników z terenów Pogorza Dynowskiego.



Ryc. 2. Procentowy udział gleb w Polsce w zależności od ich odczynu  
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Ściążko, Zuwała i wsp. 2006, s. 207–220

### 3. Wpływ popiołu ze spalania biomasy na właściwości gleb

Popioły ze spalania biomasy ze względu na zawartość składników pokarmowych oraz alkaliczny odczyn mogą stanowić substytut popularnych nawozów wapniowo-magnezowych. Nawożenie popiołami wykonuje się poza okresem wegetacyjnym roślin poprzez rozmieszczenie ich na całej powierzchni oraz przykrycie lub natychmiastowe zmieszanie z glebą [Kabała, Karczewska i wsp. 2010, s. 97-117].

W dostępnej literaturze znane są prace poświęcone rolniczemu zagospodarowaniu ubocznych produktów spalania biomasy. Badania przeprowadzone przez różnych autorów wykazały, że oddziaływanie odpadów z termicznej konwersji biomasy może być porównywalne do innych dostępnych na rynku nawozów. Popioły powstające w wyniku spalania biomasy charakteryzują się obecnością w swoim składzie niezbędnych dla roślin mikro- i makroskładników, co korzystnie wpływa na poprawę właściwości gleb i plonowanie roślin. Dodatkowo metale w popiołach występują w formie niemobilnej, która charakteryzuje się brakiem zdolności przenikania z popiołów do środowiska. Ogranicza to niebezpieczeństwo skażenia w związku z rolniczym zagospodarowaniem popiołów [Gizińska, Józwiakowski i wsp. 2016, s. 280-285].

Alkaliczny odczyn popiołów umożliwia ich zastosowanie w celu podwyższenia pH gleb kwaśnych. Studium literatury wskazuje na korzystne oddziaływanie ubocznych produktów spalania biomasy na wzrost wartości odczynu gleb oraz zawartość substancji odżywczych. Piekarczyk i wsp. [2011, s. 91-99] przeprowadzili badania dotyczące wpływu popiołu ze spalania jęczmienia jarego na odczyn gleby lekko kwaśnej oraz zawartość przyswajalnych składników pokarmowych, w zależności od zaaplikowanej dawki materiału pylistego (0,25-32 t/ha). Uzyskane rezultaty wykazały, że wprowadzenie do gleby popiołu ze spalania jęczmienia skutkowało wzrostem wartości pH w całym zakresie zaaplikowanych dawek, przy czym największą zmianę zanotowano dla najwyższych testowanych dawek popiołu. Zastosowanie popiołu w ilości 32 t/ha gleby spowodowało zmianę jej odczynu z lekko kwaśnego (pH = 6,5) na zasadowy (pH = 8,6). Dodatkowo Piekarczyk i wsp. [2011, s. 91-99] wykazali, że alkaliczny odczyn gleby utrzymywał się na zbliżonym poziomie nawet po ok. 4 miesiącach od zaaplikowania materiału pylistego. Uzasadnia to celowość stosowania ubocznych produktów spalania biomasy w aspekcie podwyższenia odczynu gleb kwaśnych.

Obecność w popiołach różnych pierwiastków pozwala zaspokoić zapotrzebowanie roślin na podstawowe składniki pokarmowe. Piekarczyk i wsp. [2011, s. 91-99] odnotowali pozytywny wpływ popiołu ze spalania jęczmienia na wzbogacenie gleby w substancje odżywcze. Aplikacja materiału pylistego spowodowała zróżnicowany wzrost zawartości przyswajalnych form fosforu w glebie, zależnie od zaaplikowanej dawki. Najkorzystniejszy wpływ odnotowano

jednak dla największej ilości popiołu, tj. 32 t/ha, co spowodowało wzrost zawartości fosforu w glebie o ponad 196%, z wartości 139 do 274 mg P/kg. Badania Piekarczyka i wsp. [2011, s. 91–99] potwierdziły również pozytywny wpływ nawożenia popiołem ze spalania biomasy na zawartość przyswajalnego dla roślin potasu i magnezu. Już dawki 0,5 i 1 t/ha zwiększyły zawartość potasu w glebie o odpowiednio 22 i 62%, przy czym najlepsze rezultaty osiągnięto dla ilości popiołu 30 t/ha. Aplikacja takiej dawki popiołu skutkowała wzrostem stężenia przyswajalnego potasu o ponad 1679%, z 160 do 2067 K/kg, przy czym wartość wykazywała tendencję spadkową wraz z upływem czasu. Spadek stężenia potasu w glebie spowodowany jest dużą mobilnością pierwiastka oraz jego podatnością na wymywanie. Nawożenie popiołem ze spalania jęczmienia pozwoliło również zwiększyć zawartość w glebie przyswajalnego magnezu, z wartości 22 do 37 i 44 Mg/kg, odpowiednio dla dawek 16 i 32 t/ha. W odróżnieniu od potasu, stwierdzono nieznaczny spadek stężenia magnezu wraz z upływem czasu od zaaplikowania popiołu [Piekarczyk, Kotwica i wsp. 2011, s. 91–99].

Wpływ popiołów ze spalania biomasy w aspekcie ich nawozowego wykorzystania przedstawili Piekarczyk i wsp. [2012, s. 127–135]. Badania przeprowadzono dla popiołu ze spalania słomy w dawkach rzędu 0,25–8 t/ha. Analiza uzyskanych wyników wykazała, że aplikacja popiołu w dawce 8 t/ha skutkowała zmianą wartości pH gleby z 6,5 do 7,5, przy czym znaczące różnice uzyskano dla melioracyjnych dawek popiołu w granicach 10–20 t/ha. Piekarczyk i wsp. [2012, s. 127–135] odnotowali również, że wprowadzanie do gleby popiołu skutkowało wzrostem stężenia składników pokarmowych dla roślin, zależnym od zaaplikowanej dawki popiołu. Już dawka 1 i 2 t/ha popiołu ze spalania słomy rzepaku pozwoliła zwiększyć zawartość przyswajalnego fosforu o odpowiednio: 24 i 27%, przy czym najlepsze rezultaty uzyskano w przypadku największej ilości wprowadzonego materiału pylistego (wzrost stężenia P o około 43%). Wykazano również, że zawartość P w glebie po dodaniu popiołu była stabilna i podlegała niewielkim zmianom wraz z upływem czasu. Zastosowana w badaniach Piekarczyka i wsp. [2012, s. 127–135] gleba charakteryzowała się wysoką zawartością potasu na poziomie 160 mg K/kg, a dawkowanie popiołu ze spalania biomasy spowodowało wzrost stężenia ww. pierwiastka. Już ilość popiołu rzędu 0,75 i 1 t/ha pozwoliła zwiększyć udział przyswajalnego K w glebie o średnio 22,5 i 40%, przy czym istotne zmiany nastąpiły dla dawek powyżej 2 t/ha. Aplikacja popiołu w ilości 8 t/ha zwiększyła stężenie K w glebie o ponad 235% względem próby kontrolnej. Z uwagi na występowanie potasu w formie mobilnej, zawartość przyswajalnego pierwiastka w glebie wykazywała tendencję spadkową wraz z upływem czasu. Piekarczyk i wsp. [2012, s. 127–135] odnotowali, że po około 120 dniach od wprowadzenia popiołu do gleby, ilość potasu zmniejszyła się



o około 211 mg K/kg w porównaniu ze stężeniem po 30 dniach od aplikacji nawozu.

Dodatkową zaletą nawożenia gleby popiołem ze spalania słomy było zwiększenie zawartości magnezu, przy czym największy wpływ odnotowano dla dawek popiołu w zakresie 4–8 t/ha. Badania Piekarczyka i wsp. [2012, s. 127–135] wykazały, że zastosowanie popiołu w melioracyjnych dawkach (czyli dawkach użyźniających, dużo wyższych względem dawek nawozowych) >8 t/ha pozwoliło zmienić klasę zasobności gleby w magnez z niskiej do średniej. Jednak wraz z upływem czasu od aplikacji popiołu zanotowano zmniejszenie zawartości Mg, przy czym był on zdecydowanie wolniejszy niż dla potasu.

Działanie popiołu w aspekcie poprawy właściwości fizykochemicznych gleb zbadali również Meller i Bilenda [2012, s. 287–292]. Celem przeprowadzonych badań była ocena oddziaływania popiołu ze spalania zrębek drzewnych, wierzby energetycznej i słomy, w dawkach 3,5–10,5 Mg/ha, na wartość pH i kwasowość hydrolityczną gleby. Uzyskane przez Mellera i Bilendę [2012, s. 287–292] wyniki potwierdziły pozytywny wpływ popiołu w aspekcie rolniczego zagospodarowania. W porównaniu z glebą nienawożoną, zanotowano dla najwyższej dawki popiołu zmianę wartości pH z 5,20 do wartości 5,74. Zjawisku towarzyszył również spadek kwasowości hydrolitycznej średnio o 0,58 me/100 g gleby w porównaniu z glebą nienawożoną. Aplikacja popiołów ze spalania biomasy przyczyniła się również do zwiększenia stopnia wysycenia kompleksu związkami zasadowymi o ok. 12% dla dawki popiołu 10,5 Mg/ha. Stopień wysycenia kompleksu sorpcyjnego związkami zasadowymi definiuje się jako procentowy udział zasadowych kationów ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{NH}_4^{+}$ ) w pojemności sorpcyjnej gleby. Wysycenie waha się w granicach od blisko 0% dla gleb kwaśnych i bardzo ubogich do około 100% dla żyznych, węglanowych i próchnicznych gleb [<http://www.encyklopedialesna.pl>, dostęp: 21.06.2018].

Również i w tym przypadku, wprowadzenie do gleby ubocznych produktów spalania biomasy pozwoliło zwiększyć jej zasobność w P, Mg i K, przy czym największy wzrost odnotowano dla potasu. Aplikacja najwyższej testowanej dawki popiołu skutkowałą zmianą klasy zasobności gleby w potas od średniej do bardzo wysokiej [Meller, Bilenda 2012, s. 287–292].

Brak zagrożenia dla środowiska w przypadku umiejętnego stosowania powoduje, że popiół ze spalania biomasy można uznać za tani i skuteczny nawóz zasadowy, pokrywający zapotrzebowanie na potas. Piekarczyk [2013, s. 92–98] w swoich badaniach wykazał przydatność popiołu ze spalania słomy w aspekcie poprawy zasobności gleby kwaśnej w makro- i mikrośladniki. Zastosowanie ubocznych produktów spalania słomy w rolnictwie jest istotne z uwagi na coraz częstsze spalanie materiału w celach energetycznych. Użyta w badaniach Piekarczyka [2013, s. 92–98] gleba charakteryzowała się kwaśnym odczynem równym

5,1 i wykazywała potrzebę wapnowania. Zastosowanie popiołu w dawkach rzędu 0,25–1,0 t/ha nie wpłynęło w znaczący sposób na zmianę odczynu gleby. Aplikacja popiołu w ilości 1 t/ha spowodowała zmianę pH zaledwie o 1 jednostkę do wartości ok. 5,4, co wskazuje na skuteczność działania popiołu w dawkach melioracyjnych > 10 t/ha [Piekarczyk 2013, s. 92-98].

Dawki popiołu ze spalania słomy w zakresie 0,25–1 t/ha nie spowodowały również znaczącego wzbogacenia gleby w makroelementy. Aplikacja popiołu w ilościach 0,75 i 1 t/ha pozwoliła zwiększyć zawartość przyswajalnego fosforu w glebie odpowiednio o 6 i 7%. Już sama gleba charakteryzowała się średnią zawartością K, a wprowadzenie popiołu zwiększyło zawartość potasu o ok. 15% przy dawce 1 t/ha. Niewielkie zmiany zasobności gleby w P, K i Mg były spowodowane niskimi dawkami aplikowanego popiołu [Piekarczyk 2013, s. 92–98].

Popioły ze spalania biomasy są również źródłem mikroelementów, takich jak: cynk, mangan, miedź oraz żelazo. Badania licznych autorów potwierdziły jednak nieznaczny wpływ popiołów ze spalania biomasy na wzrost stężenia pierwiastków śladowych w glebie. Rezultaty uzyskane przez Piekarczyka i wsp. [2011, s. 91–99] wykazały znikomy wzrost zawartości Zn, Fe, Cu, Mn i B, co nie wpłynęło na zmianę klasy zasobności gleby w te pierwiastki. Chociaż nawożenie gleby popiołami powstającymi podczas termicznego przekształcania biomasy w niewielkim stopniu wpływa na zwiększenie udziału mikroskładników, takich jak: krzem, cynk, fosfor, to niewątpliwą korzyścią rolniczego zastosowania popiołów jest ograniczenie zjawiska zubożenia w nie gleb w wynoszone z pól wraz z plonami roślin [Piekarczyk, Jaskulski i wsp. 2012, s. 127–135]. Mikroskładniki (mikronutrienty) są zdefiniowane jako pierwiastki występujące w niewielkich ilościach w glebie, które są jednak niezbędne dla prawidłowego wzrostu roślin [<http://nawozy.eu>, dostęp: 21.06.2018]. Dodatkową zaletą aplikacji popiołów ze spalania biomasy w rolnictwie jest brak pogorszenia jakości gleby przy zastosowaniu ich w optymalnych dawkach, co może mieć niekiedy miejsce w przypadku stosowania przez rolników niektórych mineralnych nawozów kwaśnych [Piekarczyk 2013, s. 92–98].

#### **4. Wpływ popiołu ze spalania biomasy na wzrost i plonowanie roślin**

Popioły ze spalania biomasy są najstarszym nawozem mineralnym. Ze względu na wysokie stężenie Ca i Mg, uboczne produkty spalania biomasy stanowią substytut nawozów wapniowych, wykazując działanie odkwaszające [[http://powermeetings.eu/konferencje/prezentacje/FTEB\\_27-202011/21%20R.Waclawowicz.pdf](http://powermeetings.eu/konferencje/prezentacje/FTEB_27-202011/21%20R.Waclawowicz.pdf), dostęp: 21.06.2018]. Stosowanie popiołu w celach nawozowych zapobiega niedoborom wapnia, który przyczynia się m.in. do zahamowania

wzrostu roślin, pojawiania się suchej zgnilizny na wierzchołkach owoców oraz tzw. gorzkiej plamistości podskórnej.

Wartość pH popiołów ze spalania biomasy (pH = 9–13) determinuje możliwość ich stosowania jako substytutu wapna nawozowego. Dane zaczerpnięte z literatury [<http://www.poradnikogrodniczy.pl/popiol-drzewny-jako-nawoz.php>, dostęp: 21.06.2018] podają, że aplikacja popiołu ze spalania zrębek drzewnych pozwala zwiększyć plonowanie roślin na niektórych rodzajach gleb nawet o 45% względem tradycyjnych nawozów wapniowych. Dodatkowo, w porównaniu do powszechnie stosowanych nawozów azotowych, popioły z termicznego przekształcania biomasy idealnie nadają się do nawożenia w okresie jesiennym. Zawarty w popiołach fosfor i potas pozwalają przygotować rośliny do przezimowania. Zabieg nawożenia popiołem ze spalania biomasy można również wykonywać na rabatach oraz pod rośliny tolerujące zasadowy odczyn gleby, m.in. głóg, bukszpan wieczniezielony (tab. 3.) [<http://www.poradnikogrodniczy.pl/popiol-drzewny-jako-nawoz.php>, dostęp: 21.06.2018].

Uboczne produkty spalania biomasy dzięki alkalicznemu odczynowi idealnie nadają się do zabiegów pielęgnacyjnych trawników przez przeciwdziałanie powstawaniu mchu. Badania Stankowskiego i wsp. [2008, s. 176] potwierdziły pozytywny wpływ popiołu z biomasy na plonowanie gatunku trawy *Festolium*, w porównaniu do trawy nienawożonej. Oddziaływanie popiołu na szybkość wzrostu trawy było porównywalne do działania innych nawozów mineralnych. Dodatkowo, dzięki zawartości w swoim składzie Fe, popioły wpływają na poprawę kondycji i zabarwienia trawy [Stankowski, Wołoszyk i wsp. 2008, s. 176]. W celu uniknięcia przenawożenia, podczas aplikacji popiołów należy zrezygnować ze stosowania innych nawozów zawierających magnez, potas, żelazo czy wapń. Łączne dozowanie popiołów ze spalania biomasy i innych nawozów mineralnych może spowodować problemy z pobieraniem żelaza lub boru, co w konsekwencji osłabia trawę [<http://www.poradnikogrodniczy.pl/popiol-drzewny-jako-nawoz.php>, dostęp: 21.06.2018].

Tabela 3. Gatunki roślin dobrze oraz źle znoszące stosowanie popiołów ze spalania biomasy

Rośliny dobrze znoszące zasolenie spowodowane dawkowaniem popiołów	Rośliny umiarkowanie znoszące zasolenie spowodowane nawożeniem popiołem	Rośliny źle znoszące zasolenie spowodowane dawkowaniem popiołów
perz, jęczmień, rzepak, słonecznik, szparagi, kukurydza	ziemniaki, len, melon, dynia, lucerna, wyka	borówka, jagoda kamczacka, jagody goi, różanecznik, azalia, krzewy iglaste

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [<http://www.poradnikogrodniczy.pl/popiol-drzewny-jako-nawoz.php>, dostęp: 21.06.2018]

Studium literatury potwierdza korzystny wpływ nawożenia popiołami ze spalania biomasy na wzrost, plonowanie i budowę morfologiczną roślin. Zapałowska [2015, s. 1-94] zbadała wpływ ubocznych produktów spalania różnej biomasy roślinnej na plonowanie zbóż. W badaniach zastosowano popioły ze spalania: zrębek drzewnych, zrębek drzewnych + kukurydzy + słomy, zrębek drzewnych + wierzby, ziarna owsa, słomy kukurydzy ozimej oraz zrębek drewna dębowego, w dawkach odpowiednio 3 i 6 t/ha. W każdym przypadku aplikacja popiołu skutkowała wzrostem plonowania średnio o 3-19%, w zależności od rodzaju zastosowanego materiału. Najlepsze efekty uzyskano w przypadku nawożenia zbóż popiołem ze spalania owsa, natomiast najmniej skuteczny okazał się popiół ze spalania mieszaniny zrębek drzewnych i wierzby [Zapałowska 2015, s. 1-94].

Uboczne produkty spalania stanowią doskonały substytut nawozów mineralnych o wysokiej skuteczności działania. Badania Mellera i Bilendy [2012, s. 287-292] wykazały, że zastosowanie popiołu w dawce 60 t/ha pozwoliło uzyskać o około 10% wyższe plony kukurydzy w stosunku do roślin nawożonych powszechnie dostępnymi nawozami mineralnymi. Dodatkowo, aplikacja popiołu skutkowała wzrostem zawartości Mg i P w ziarnie kukurydzy, przy czym najlepsze rezultaty uzyskano dla największych testowanych dawek popiołu, tj. 60 i 120 t/ha. Meller i Bilenda [2012, s. 287-292] odnotowali również wzrost zawartości K, Ca oraz Na w ziarnie kukurydzy w porównaniu z próbą kontrolną. Nie stwierdzono jednak wyraźnych zależności między zawartością pierwiastków w ziarnie zbóż a zastosowaną dawką popiołu, przy czym stężenie Mn, Zn oraz Cu w zielonej masie kukurydzy było wyższe dla większych ilości zaaplikowanych materiałów pylistych.

Ze względu na zawartość składników nawozowych w popiołach, w ostatnich latach są prowadzone badania nad możliwością produkcji nawozów rolniczych bazujących na ubocznych produktach spalania biomasy. Przykładem może być projekt EKO-ASH, realizowany przez: Elektrownię w Połańcu, Laboratorium Uniwersytetu w Poznaniu oraz Zakład Przerobu Biomasy w Biechowie [<http://www.ekoash.pl/>, dostęp: 21.06.2018]. Głównym celem projektu jest opracowanie innowacyjnej technologii wytwarzania nawozu mineralnego na bazie popiołu ze spalania 100% biomasy w tzw. Zielonych Blokach Energetycznych. Rezultaty wstępnych badań potwierdziły pozytywny wpływ uzyskanego nawozu na plonowanie roślin, co w przyszłości może przyczynić się do popularyzacji stosowania popiołów w zabiegach rolniczych [<http://www.ekoash.pl/>, dostęp: 21.06.2018].

## 5. Zakończenie

Zapotrzebowanie na biomasę przez energetykę zawodową w Polsce jest szacowane na około 8,3 mln ton suchej masy w 2020 r. i około 10,3 mln ton w 2030 r. [Meller, Bilenda 2013, s. 339–345]. Wzrost zainteresowania biomasą może się przyczynić w ciągu kolejnych 2–3 lat do nagromadzenia ponad 200 tys. ton ubocznych produktów spalania, które zgodnie z polskim prawodawstwem należy poddać odpowiedniemu zagospodarowaniu [[http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi.../cgiirbis\\_64.exe](http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi.../cgiirbis_64.exe), dostęp: 21.06.2018]. Popioły ze spalania biomasy, ze względu na skład chemiczny oraz specyficzne właściwości, wykazują ograniczenia w zakresie stosowania w sektorze budowlanym. Alternatywne rozwiązanie może stanowić ich zagospodarowanie w zabiegach rolniczych.

Popioły ze spalania biomasy charakteryzują się alkalicznym odczynem oraz zasobnością w składniki pokarmowe, przy stosunkowo niskiej zawartości metali ciężkich i substancji toksycznych, w związku z czym ich zastosowanie w celach rolniczych jest uzasadnione. Doniesienia literatury potwierdzają korzystny wpływ ubocznych produktów spalania biomasy na wzrost wartości pH gleb oraz na rozwój i plonowanie roślin. Ze względu na obecność mikro- i makroskładników, popioły zwiększają zasobność gleby w magnez, potas, wapń oraz fosfor nawet o kilkadziesiąt procent względem prób kontrolnych.

Rekultywacyjne działanie popiołów jest również istotne z uwagi na znaczny odsetek w Polsce gleb zdewastowanych i zdegradowanych. Informacje zawarte w Raporcie GUS z 2014 r. podają, że ponad 70% gleb w Polsce ma kwaśny odczyn, co pociąga za sobą potrzebę ich wapnowania [[www.stat.gov.pl](http://www.stat.gov.pl), dostęp: 21.06.2018]. Odkwaszające działanie popiołów ze spalania biomasy umożliwia ich zastosowanie w charakterze substytutu wapna bez ryzyka tzw. przewapnowania gleby. Dodatkową korzyścią dla rolników, związaną ze stosowaniem popiołów z biomasy, jest ograniczenie wydatków związanych z zakupem tradycyjnych nawozów.

Korzystny skład chemiczny powoduje, że popiół ze spalania biomasy można uznać za tani i skuteczny nawóz o charakterze zasadowym, pokrywającym zapotrzebowanie na potas. Aplikacja popiołów do gleby umożliwia z jednej strony unieszkodliwianie ubocznych produktów spalania biomasy, z drugiej zaś strony daje możliwość wykorzystania cennego nawozu przy niższych kosztach w stosunku do nawozów mineralnych. Zastosowanie ubocznych produktów spalania biomasy w celach nawozowych jest preferowanym działaniem również na terenach Pogórza Dynowskiego. Specyfika regionu (dominacja obszarów rolniczych oraz łąk i pastwisk) wymusza konieczność prowadzenia częstych zabiegów nawozowych. Wspomniany sposób utylizacji popiołów pozwala dostarczyć roślinom cennych składników pokarmowych, przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów związanych z zakupem sztucznych nawozów.

**Bibliografia**

1. Ciesielczuk T., Kusza G., Nemś A., *Nawożenie popiołami z termicznego przekształcania biomasy źródłem pierwiastków śladowych dla gleb*, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, t. 22, nr 49(4), 2011.
2. Czekał M., *Ekonomiczno-środowiskowe aspekty nawożenia gleby – innowacyjne rozwiązania stosowane w tym zakresie*, *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, t. 14, z. 5, 2012.
3. Gizińska M., Józwiakowski K., Kowalczyk-Juśko A., Pytka A., Marzec M., *Produktywność biomasy i właściwości energetyczne roślin z hybrydowej gruntowo-roślinnej oczyszczalni ścieków w pierwszym roku eksploatacji*, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 7, 2013.
4. Kabała C., Karczeńska A., Kozak M., *Przydatność roślin energetycznych do rekultywacji i zagospodarowania gleb zdegradowanych*, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Rolnictwo*, t. 96, 2010.
5. Kwaśniewski D., *Ocena produkcji i potencjalnych możliwości wykorzystania słomy do celów grzewczych na przykładzie powiatu żywieckiego*, *Inżynieria Rolnicza*, R. 12, nr 6(104), 2008.
6. Meller E., Bilenda E., *Wpływ nawożenia popiołami z biomasy na plon i pobieranie składników przez kukurydzę zwyczajną*, *Polityka Energetyczna*, t. 16, z. 3, 2013.
7. Meller E., Bilenda E., *Wpływ popiołów ze spalania biomasy na właściwości fizykochemiczne gleb lekkich*, *Polityka Energetyczna*, t. 15, z. 3, 2012.
8. Niedziółka I., Zuchniarz A., *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*, *MOTROL. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, t. 8A, 2006.
9. Niezgodna D., *Optymalność substytucji nawozów mineralnych środkami ochrony roślin w procesie produkcji roślinnej*, *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej*, t. 344, nr 3, 2015.
10. Piekarczyk M., *Zawartość przyswajalnych form niektórych makro- i mikroelementów w glebie lekkiej nawożonej popiołem ze słomy pszenicy ozimej*, *Fragmenta Agronomica*, 30, nr 1, 2013.
11. Piekarczyk M., Kotwica K., Jaskulski D., *Wpływ stosowania popiołu ze słomy jęczmienia jarego na chemiczne właściwości gleby lekkiej*, *Fragmenta Agronomica*, t. 28, nr 3, 2011.
12. Piekarczyk M., Jaskulski D., Kotwica K., *Wpływ popiołu ze słomy rzepaku ozimego na pH oraz zawartość przyswajalnych makroelementów (P, K, Mg) i mikroelementów (B, Cu, Mn, Zn, Fe) w glebie lekkiej*, *Fragmenta Agronomica*, t. 29, nr 3, 2012.
13. *Rocznik Statystyczny Rolnictwa*, Warszawa 2014.
14. Schleicher S.T., *The renewables in the future energy mix*, Central European Biomass Conference, Gratz 2005.
15. Stankowski S., Wołoszyk Cz., Meller E., Bury M., Bielińska J.E., *Der Einfluss von Ascheaus der Biomasse auf Bodeneigenschaften und Ertrage von Festulolium*. 2. *Rostocker Bioenergieforum. Innovationen für Klimaschutz und Wirtschaftliche Entwicklung*, 29–30 Oktober 2008, Rostock Universität.
16. Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M., *Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową*, *Energetyka*, nr 3, 2006.

17. Uliasz-Bocheńczuk A., Pawluk A., Pyzalski M., *Charakterystyka popiołów ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych*, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 32, z. 3, 2016.
18. Uliasz-Bocheńczuk A., Pawluk A., Skierka J., *Wymywalność zanieczyszczeń z popiołów lotnych ze spalania biomasy*, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 31, z. 3, 2015.
19. Wilk B., *Określenie zależności wartości opałowej od wybranych właściwości fizykochemicznych biomasy. Materiały Seminarium „Techniki analityczne i procedury badawcze w zastosowaniu do nowych uwarunkowań prawnych w energetyce”*, IChPW, Zabrze 2006.
20. Wójcik M., Stachowicz F., Masłoń A., *Możliwość wykorzystania popiołów lotnych w celu poprawy odwadniania osadów ściekowych*, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury JCEEA*, z. 64, nr 1, 2017b.
21. Wójcik M., Stachowicz F., Masłoń A., *The application of biomass ashes for the improvement of sewage sludge dewatering*, *E3S Web of Conferences*, t. 17, 2017a.
22. Zapałowska A., *Możliwość wykorzystania popiołu z biomasy i osadów ściekowych do nawożenia topinamburu na cele energetyczne*, *Praca doktorska*, Koszalin 2015.

### Akty prawne

23. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz. U. z 2008 r. Nr 119, poz. 765).
24. Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz. U. z 2007 r. Nr 147, poz. 1033).
25. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. z 2013 r., poz. 21).

### Strony internetowe

26. [http://powermeetings.eu/konferencje/prezentacje/FTEB\\_27-202011/21%20R.Waclawowicz.pdf](http://powermeetings.eu/konferencje/prezentacje/FTEB_27-202011/21%20R.Waclawowicz.pdf) (dostęp: 21.06.2018).
27. <http://www.ekoash.pl/> (dostęp: 21.06.2018).
28. <http://www.encyklopedialesna.pl> (dostęp: 21.06.2018).
29. <http://www.instsani.pl/427/charakterystyka-biomasy> (dostęp: 21.06.2018).
30. <http://www.kierunekenergetyka.pl/magazyn,popioly-z-biomasy.html> (dostęp: 21.06.2018).
31. <http://www.nawozy.eu> (dostęp: 21.06.2018).
32. <http://www.poradnikogrodniczy.pl/popiol-drzewny-jako-nawoz.php> (dostęp: 21.06.2018).
33. [http://www.pzits.not.pl/docs/ksiazki/Pol\\_%202012/Czech%2073-82.pdf](http://www.pzits.not.pl/docs/ksiazki/Pol_%202012/Czech%2073-82.pdf) (dostęp: 21.06.2018).