

Marta Wójcik

Adam Masłoń

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

POTENCJAŁ WYKORZYSTANIA UBOCZNYCH PRODUKTÓW SPALANIA SŁOMY NA CELE ROLNICZO-GOSPODARCZE

Streszczenie

Słoma jest jednym z podstawowych rodzajów biomasy pozyskiwanym z produkcji rolniczej. W wyniku ograniczenia hodowli i chowu zwierząt gospodarskich, nadwyżki słomy 2011 r. szacowane były na około 8-10 mln ton. Obecnie krajowe nadwyżki słomy szacuje się na 9-12 mln Mg, co odpowiada około 6 mln ton węgla kamiennego. Nadmiar wyprodukowanej słomy można zastosować w procesach termicznych, zarówno w energetyce lokalnej i systemowej oraz w indywidualnych gospodarstwach domowych. Problemem pozostaje jednak utylizacja ubocznych produktów spalania biomasy, które należy zagospodarować zgodnie z wymogami prawnymi i ochrony środowiska. W pracy przedstawiono możliwości unieszkodliwiania ubocznych produktów spalania słomy zbóż. Uzyskany popiół ze względu na skład chemiczny oraz niską zawartość metali ciężkich może być stosowany jako cenny nawóz w zabiegach rolniczych. Wyznaczono również wpływ mechanicznego kondycjonowania osadów ściekowych z zastosowaniem popiołu z termicznej konwersji słomy na efektywność procesu odwadniania. Aplikacja ubocznych produktów spalania do gleby w celach nawozowych wzbogaca ją w składniki pokarmowe i przyczynia się do propagowania zasad zrównoważonego rozwoju.

Słowa kluczowe: słoma, popiół ze słomy, popioły z biomasy, biomasa, rolnictwo, gospodarka osadowa, osady ściekowe

THE POTENTIAL OF USE OF STRAW COMBUSTION BY-PRODUCTS IN COMMERCIAL AND AGRICULTURAL PURPOSES

Summary

Straw is sort of biomass derived from agricultural production. Due to the reduction of livestock farming, the surplus of straw were approximately 8-10 million tons in 2011. Currently, the domestic surplus of straw is estimated at approximately 9-12 million Mg which corresponds to about 6 tons of coal. The excess of produced straw might be used in thermal processes, for example: in local and systemic energy or even in individual households. The main problem is associated with biomass combustion by-products, which have to be managed in line with law and environmental regulations. This paper presents the possibilities of ashes utilization from straw combustion. Due to the chemical composition and low content of heavy metals ash formed during straw combustion might be applied in agricultural practices. The influence of sewage sludge conditioning with straw ash on the effectiveness of sewage sludge dewater-

ing was also examined. The application of biomass ashes enriches the soil with nutrients and contributes to the implementation of the principles of sustainable development.

Keywords: straw, wheat ash, biomass ashes, biomass, agriculture, sewage sludge management, sewage sludge

1. Wprowadzenie

Szczególną rolę wśród odnawialnych źródeł energii zyskuje biomasa, które zajmuje coraz bardziej znaczącą pozycję w energetyce zawodowej. Zgodnie z definicją zawartą w Ustawie z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych [28], jako biomasę definiuje się stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, przemysłu przetwarzającego ich produkty. Położenie hydro-geograficzne Polski uniemożliwia uzyskanie znacznego udziału energii z wód, wiatru czy źródeł geotermalnych w produkcji energii końcowej, w związku z czym obserwuje się systematyczny wzrost udziału biomasy wśród paliw alternatywnych. Na przestrzeni lat produkcja energii elektrycznej uzyskanej ze spalania biomasy wzrosła w Polsce ponad pięciokrotnie i w 2016 r. wyniosła blisko 5 TWh [32, 36]. Według Michalika [13], na potrzeby produkcji energii elektrycznej w 2012 r. w Polsce zużyto 7,1 Mg biomasy. Dalsze prognozy wskazują na nawet 50% udział biomasy w produkcji energii elektrycznej do 2020 roku [13].

Wymagania Unii Europejskiej dotyczące zwiększenia udziału energii odnawialnej w produkcji energii końcowej (15% do 2020 r.) oraz stosunkowo niski koszt pozyskiwania, w porównaniu do paliw kopalnych powoduje wzrost zużycia biomasy w krajowych elektrowniach oraz elektrociepłowniach. W 2005 r. w elektrowniach i elektrociepłowniach opalanych węglem kamiennym zużycie biomasy wyniosło około 9,3 mln TJ, podczas gdy w 2013 r. już ponad 42 mln TJ [21]. Za rosnącą popularnością biomasy na światowym rynku energetycznym przemawiają również aspekty środowiskowe. Biomasa traktowana jest jako źródło czystej energii o praktycznie „zerowej” emisji dwutlenku węgla i niewielkiej emisji SO_x. Badania wykazały, że podczas spalania wspomnianego materiału wydziela się tylko taka ilość CO₂, jaką pobrała roślina z atmosfery w procesie fotosyntezy [24]. Zarówno czynniki ekologiczne, jak i ekonomiczne przyczyniają się do coraz szerszego wykorzystania biomasy w sektorze energetycznym.

Spalanie biomasy jest złożonym i zarazem trudnym procesem technologicznym z uwagi na jej znaczne zróżnicowanie w kolejnych cyklach dostaw, zwłaszcza dotyczące zawartości wilgoci. Wzrost zawartości wody skutkuje obniżeniem wartości opałowej biomasy, co jest niekorzystnym zjawiskiem z punktu widzenia energetyki. Dodatkowym problemem pozostaje konieczność zagospodarowania ubocznych produktów spalania biomasy.

Spośród różnych rodzajów biomasy szczególną pozycję na rynku energetycznym zajmuje biomasa roślinna, stosowana do produkcji energii w wyniku bezpośredniego spalania bądź przetwarzana na biopaliwa ciekłe i gazowe. Wśród biopaliw stałych

najczęściej wymienia się: drewno, słomę oraz rośliny energetyczne. Są to surowce pierwotne, które oprócz niewymiernych korzyści ekologicznych i ekonomicznych, stanowią szansę rozwoju dla polskiego rolnictwa. Według Fabera i wsp. [1] zastosowanie biomasy leśnej w celach energetycznych będzie wykazywać tendencję spadkową, co przyczyni się do wzrostu zainteresowania produktami rolnymi. W tym przypadku słoma może stanowić cenne źródło energii. Niemniej jednak problemem pozostaje konieczność utylizacji ubocznych produktów spalania, tj. popiołów.

W prezentowanym artykule przedstawiono możliwości zagospodarowania popiołów ze spalania słomy, skierowane na ochronę środowiska naturalnego. Artykuł zawiera również charakterystykę fizyko-chemiczną słomy i propozycję recyklingu ubocznych produktów jej spalania. Przedstawione propozycje unieszkodliwiania popiołów ze spalania słomy stanowią nowy aspekt w produkcji rolniczej oraz gospodarce odpadami przy jednoczesnym uwzględnieniu zasad zrównoważonego rozwoju.

2. Charakterystyka słomy pod kątem rolniczego i energetycznego zastosowania

Wzrastające wymagania w zakresie zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych oraz obniżenie znaczenia energetyki jądrowej spowodowało rosnącą popularność biomasy jako źródła taniej i czystej energii. W ostatnich latach obserwuje się wzrastające zainteresowanie budową nowych i modernizacją już funkcjonujących kotłowni, celem przejścia z paliw kopalnych na biomasę [31]. Zaletą spalania słomy jest również niewielka ilość popiołu, rzędu 3–5% ilości spalanego materiału [12].

Według Karcza i wsp. [6] wśród roślin uprawianych w Polsce szczególną rolę odgrywa słoma zbóż. Zgodnie z definicją zawartą w *Małej Encyklopedii Rolniczej* [2], słoma są to dojrzałe lub wysuszone źdźbła roślin zbożowych lub strączkowych, które wraz z biogazem i biopaliwami płynnymi tworzą grupę tzw. biopaliw. Słoma jest materiałem, który wytwarza się powszechnie w większości małych i średnich gospodarstwach rolnych. Obecnie zbiory słomy w kraju szacowane są na około 29,3 mln ton rocznie, przy średniej wartości nadwyżki na poziomie 11,5 mln ton [6]. Roczna produkcja słomy podlega znacznym wahaniom, co uzależnione jest od powierzchni upraw, wielkości plonów, gatunków i odmian roślin, nawożenia oraz czynników atmosferycznych.

Skład chemiczny słomy różnych zbóż przedstawiono w tabeli 1. W zależności od gatunku rośliny, słoma zawiera 45–55% celulozy, 26–32% hemicelulozy oraz 16–21% ligniny [14]. Badania Karcza i wsp. [6] wykazały, że słoma żytnia i jęczmienna zawiera podwyższoną zawartość chloru, z kolei słoma uzyskiwana z kukurydzy – większą ilość siarki. Słoma rzepakowa w porównaniu do słomy zbóż charakteryzuje się wyższą koncentracją węgla, azotu, siarki i chloru. Poza rodzajem rośliny, z której uzyskuje się słomę, zmienność składu fizyko-chemicznego zdeterminowana jest również przez położenie geograficzne. Wyniki badań Karcza i wsp. [6] potwierdziły, że słoma pochodząca z najbardziej uprzemysłowionych regionów Polski charakteryzuje się największym stężeniem siarki i chloru oraz wykazuje najmniejszą kaloryczność (tab. 2).

Tab. 1. Skład chemiczny słomy zbóż

Rodzaj słomy	Pierwiastek [% s.m.]							
	C	H	O	N	S	Cl	Popiół	Części lotne
Żytnia	46,6	6,0	41,9	0,5	0,085	0,40	4,8	76,4
Pszenna	45,6	5,8	42,1	0,5	0,082	0,19	5,7	77,0
Pszennyto	43,9	5,9	43,5	0,4	0,056	0,26	6,0	75,2
Jęczmienna	47,5	5,9	45,6	0,5	0,089	0,40	4,8	77,3
Kukurydziana	45,7	5,3	41,1	0,7	0,177	0,35	6,7	76,8
Rzepakowa	47,1	5,9	39,3	0,8	0,270	0,47	6,2	75,8

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: H. Karcz, M. Kantorek, M. Grabowicz, K. Wierzbicki, *Możliwości wykorzystania słomy jako źródła paliwowego w kotłach energetycznych, Piece Przemysłowe & Kotły*, t. 11-12, 2013, s. 8-15.

Tab. 2. Zróżnicowanie składu chemicznego słomy w zależności od regionu Polski

Region Polski	Składnik [% s.m.]							Wartość opałowa [MJ/kg]
	C	H	N	S	Cl	O	K	
Dolny Śląsk	47,85	5,97	0,84	0,03	0,65	37,92	16,94	17,112
Śląsk Opolski	43,22	5,62	0,73	0,02	0,72	41,83	18,49	16,985
Górny Śląsk	49,15	5,48	0,94	0,16	0,87	32,06	17,51	17,046
Małopolska	46,49	5,12	0,65	0,14	0,94	38,51	20,56	16,985
Świętokrzyskie	45,92	6,08	0,79	0,04	0,48	40,44	15,60	17,286
Polesie	48,25	6,27	0,96	0,01	0,35	39,30	15,94	17,365
Mazury	47,50	0,13	0,84	0,01	0,28	37,92	10,93	17,562
Żuławy	49,74	6,08	0,58	0,01	0,35	39,09	11,03	17,285
Kujawy	48,35	6,15	0,84	0,02	0,27	39,01	14,40	17,396
Mazowsze	46,82	6,05	0,64	0,06	0,53	39,06	14,21	17,142
Środkowopomorskie	45,18	5,36	0,58	0,08	0,24	40,63	17,81	16,985
Zachodniopomorskie	44,72	5,08	0,93	0,17	0,56	42,02	18,19	17,056
Wielkopolska	45,36	5,42	0,74	0,07	0,26	42,78	19,78	17,126
Warmia	47,24	5,93	0,85	0,13	0,42	40,50	17,72	17,228

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: H. Karcz, M. Kantorek, M. Grabowicz, K. Wierzbicki, *Możliwości wykorzystania słomy jako źródła paliwowego w kotłach energetycznych, Piece Przemysłowe & Kotły*, t. 11-12, 2013, s. 8-15.

Słoma zbóż oraz rzepaku jest powszechnie stosowana w gospodarstwach rolnych na terenie całego kraju jako pasza lub podściółka w hodowli zwierząt gospodarskich. Z uwagi na ujemny bilans substancji organicznej w glebie, celowy jest również zabieg jej przyorywania na polach. Zdaniem Karcz i wsp. [6], 1 tona suchej masy obornika jest równoważna około 154 tonom słomy.

Z 1 kg słomy o wilgotności średnio 15% można uzyskać około 14,3 MJ energii, co jest równoważne spalaniu 0,81 kg drewna opałowego lub 0,41 m³ gazu ziemnego wysokometanowego [32]. Pod względem energetycznym, 1,5 tony słomy odpowiada 1 tonie średniej jakości węgla kamiennego [3]. Jednakże wadą słomy jako paliwa jest

znaczące zróżnicowanie materiału, w związku z czym zastąpienie paliw kopalnych słomą jest łatwe do realizacji tylko w lokalnych systemach energetycznych.

W Polsce słoma może znaleźć zastosowanie do ogrzewania mieszkań, budynków w gospodarstwach rolnych lub w kotłowniach komunalnych. Specyficzne właściwości fizyko-chemiczne słomy powodują jednak, że jest ona problemowym i trudnym materiałem do termicznej konwersji. Według Karcza i wsp. [6] warunkiem efektywnego spalania słomy jest zapewnienie wilgotności poniżej 15% (optymalnie poniżej 10%), przy czym zawartość wilgoci w świeżej słomie mieści się w przedziale 12–22%, a w niektórych przypadkach może dochodzić nawet do 60%. Zbyt wysoki stopień wilgotności wpływa negatywnie na wartość opałową. Dodatkową przeszkodą jest podatność słomy na pochłanianie wody i gazów z otoczenia, co negatywnie wpływa na parametry spalania. Wadą słomy pod kątem energetycznego zagospodarowania jest również mała gęstość nasypowa, co przyczynia się do problemów z transportem i ogranicza możliwość jej zastosowania tylko w energetyce rozproszonej dla lokalnych kotłowni [6]. Zależność pomiędzy fizyczną strukturą słomy a jej gęstością nasypową przedstawiono w tabeli 3. W przypadku użycia słomy w dużych elektrowniach i elektrociepłowniach niezbędne jest zwiększenie jej gęstości nasypowej poprzez brykietowanie lub peletowanie, co wymaga dodatkowych nakładów finansowych [35].

Świeża słoma (tzw. żółta) zawiera w swoim składzie metale alkaliczne oraz związki chloru, co wpływa negatywnie na przebieg procesu spalania. Na cele energetyczne najodpowiedniejsza jest słoma szara, pozostawiona po skoszeniu na polu przez kilka dni [33]. Zabieg tzw. wędnięcia słomy pozwala obniżyć zawartość Cl i K na skutek ługowania pierwiastków pod wpływem opadów atmosferycznych. Przekłada się to jednoznacznie na lepsze parametry słomy jako alternatywnego paliwa. Według Karcza i wsp. [6] wysoka zawartość chloru przyczynia się do tzw. korozji chlorkowej oraz tworzenia aglomeratów żuźlowych. Pomimo korzystniejszego składu chemicznego w porównaniu do słomy żółtej, typ słomy szarej charakteryzuje się dużą kruchością, co jednocześnie przekłada się na wysokie straty podczas zbioru, dochodzące nawet do 20–30% [6].

Tab. 3. Zależność między postacią fizyczną słomy a gęstością nasypową i wartością opałową

Postać fizyczna słomy	Gęstość nasypowa [kg/m ³]	Wartość opałowa [MJ/m ³]
Luźna	20–50	0,25–0,58
Pocięta	40–60	0,47–0,68
Bele sześciennie	90–165	1,04–1,91
Bele cylindryczne	110	1,26
Brykiety	300–450	3,59–5,33
Pelety	550–750	8,0–10,0

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: D. Kwaśniewski, *Ocena produkcji i potencjalnych możliwości wykorzystania słomy do celów grzewczych na przykładzie powiatu żywieckiego*, *Inżynieria Rolnicza*, t. 6, nr 104, 2008, s. 113–119.

Ilość słomy wykorzystywanej na potrzeby energetyki uzależniona jest od ilości surowca przeznaczonego na inne cele, m.in. jako pasza dla zwierząt gospodarczych lub jako ściółka. Karcz i wsp. [6] zaproponowali wzór pozwalający wyznaczyć masę słomy, którą można pozyskać na cele energetyczne w zależności od regionu kraju:

$$N = P - (Z_s + Z_p + Z_o) \cdot t$$

gdzie:

P – sumaryczna produkcja słomy zbóż i rzepaku,

Z_s – jednostkowe zapotrzebowanie słomy na cele ściólkowe,

Z_p – jednostkowe zapotrzebowanie słomy na cele paszowe,

Z_o – jednostkowe zapotrzebowanie słomy na cele organiczne,

t – ilość jednostek produkcyjnych.

Nadwyżki słomy rzędu 10 mln ton rocznie powodują, że może być ona traktowana jako potencjalne źródło energii o korzystnej charakterystyce środowiskowej. Szacuje się, że pełne wykorzystanie nadwyżek słomy może pokryć około 4% zapotrzebowania Polski na energię [4]. Niemniej jednak procesowi termicznej konwersji wspomnianego surowca towarzyszy powstawanie ubocznych produktów spalania, które należy zagospodarować zgodnie z uwarunkowaniami prawnymi, ekologicznymi, ekonomicznymi i społecznymi.

3. Charakterystyka ubocznych produktów spalania słomy

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów, popioły ze spalania słomy (fot. 1) zostały zaklasyfikowane do grupy 10: odpady z procesów termicznych, o tzw. kodzie odpadu 10 01 17 – popioły paleniskowe oraz popioły lotne ze współspalania [30].

Skład chemiczny popiołów zdeterminowany jest rodzajem spalanej słomy, w związku z czym ich charakterystyka może podlegać znacznym wahaniom. Badania własne wykazały, że dominującymi składnikami popiołu ze spalania słomy są: żelazo, glin oraz krzem, co pozwala na ich zaklasyfikowanie do popiołów glinianowo-krzemionkowych (tab. 4). Według Karcz i wsp. [6] zawartość pierwiastków w popiołach ze spalania słomy uzależniona jest w dużej mierze od rodzaju spalanej rośliny. Największym stężeniem tlenków krzemu i gliny charakteryzują się popioły ze spalania słomy rzepakowej.

Uboczne produkty spalania słomy zawierają również śladową ilość metali ciężkich w formie trudno rozpuszczalnych tlenków. Badania własne potwierdziły niską wymywalność metali z ubocznych produktów spalania słomy (tab. 5), co pozwala na ich wykorzystanie do wiązania pierwiastków występujących w środowisku w ilościach ponadnormatywnych [18].



Fot. 1. Popiół ze spalania słomy pszenicznej

Źródło: fot. M. Wójcik

Tab. 4. Skład chemiczny popiołu ze spalania słomy pszenicznej

Pierwiastek	Jednostka	Średnia zawartość
Żelazo	mg Fe/g	45,05
Glin	mg Al/g	36,29
Krzem	mg Si/g	10,05
Fosfor	mg P/g	2,78
Wapń	mg Ca/g	2,42
Mangan	mg Mn/g	1,49
Siarka	mg S/g	1,09
Magnez	mg Mg/g	0,20
Potas	mg K/g	0,18
Sód	mg Na/g	0,12
Tytan	mg Ti/g	0,11
Bar	mg Ba/g	0,07
Chlor	mg Cl/g	0,05
Cynk	mg Zn/g	0,04
Stront	mg Sr/g	0,02
Nikiel	mg Ni/g	0,02
Jod	mg J/g	0,01
Miedź	mg Cu/g	0,01
Brom	mg Br/g	0,004

Źródło: Opracowanie własne

Tab. 5. Wymywalność pierwiastków dla popiołu ze spalania słomy pszenicznej

Pierwiastek	Jednostka	Stężenie wymytego składnika
Arsen	mg/kg	0,72
Chrom	mg/kg	0,17
Cynk	mg/kg	0,39
Kadm	mg/kg	<0,02
Ołów	mg/kg	<0,1
Molibden	mg/kg	0,18
Nikiel	mg/kg	0,16
Miedź	mg/kg	0,24
Mangan	mg/kg	0,26
Wapń	mg/kg	79,2
Rtęć	mg/kg	<0,02
Żelazo	mg/kg	2,33
odczyn eluatu	pH	10,78

Źródło: Opracowanie własne

Podczas spalania biomasy powstaje ponad 10-krotnie mniejsza ilość popiołu w porównaniu do węgla kamiennego [22]. Według Niedziółki i Zuchniarza [14] podczas spalania słomy powstaje niewielka ilość popiołu, rzędu 0,5–12,5% w zależności od gatunku rośliny. Z kolei większa ilość powstającego popiołu świadczy o zanieczyszczeniu surowca.

Popioły ze spalania słomy, ze względu na zawartość substancji biogenych, mogą stanowić cenne źródło substancji pokarmowych dla roślin. Niższa koncentracja metali ciężkich w popiołach ze spalania biomasy w stosunku do odpadów z termicznego przekształcania węgla pozwala na ich rolnicze wykorzystanie bez stwarzania zagrożenia dla środowiska. Stosowanie ubocznych produktów spalania słomy w celach nawozowych jest również uzasadnione ze względów ekonomicznych i ekologicznych. Wymieniony sposób zagospodarowania popiołów ze spalania słomy daje rolnikom możliwość obniżenia kosztów nawożenia poprzez wykorzystanie ich plonotwórczych właściwości, w szczególności na terenach wiejskich.

4. Zastosowanie popiołów ze spalania słomy w zabiegach rolniczych

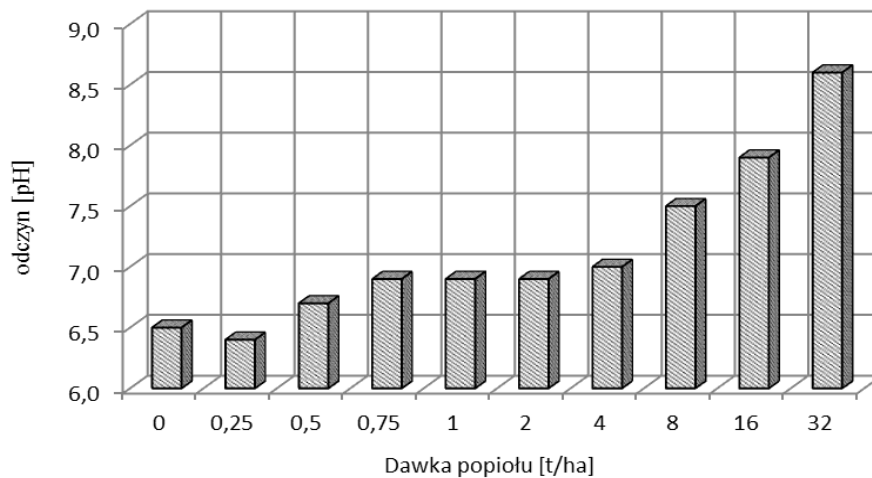
Właściwe unieszkodliwianie ubocznych produktów spalania biomasy jest częścią zrównoważonej produkcji energii. Według Zapalowskiej i wsp. [34] wzrost zainteresowania biomasą w Polsce może spowodować w ciągu kolejnych 2–3 lat do nagromadzenia około 200 tys. ton popiołów, które należy zagospodarować zgodnie z wymogami prawnymi i ekologicznymi. Ze względu na zawartość składników pokarmowych dla roślin, popioły ze spalania biomasy, w tym również ze spalania słomy mogą stanowić tańszy zamiennik dla popularnych nawozów [5].

Badania przeprowadzone przez różnych autorów [10, 11, 15, 16, 17] wykazały, że wpływ odpadów z termicznej konwersji słomy na plonowanie roślin i właściwości gleb może być porównywalny, a w niektórych przypadkach nawet lepszy niż innych dostępnych na rynku nawozów. Według Shi i wsp. [19] popioły ze spalania biomasy

drzewnej i słomy charakteryzują się lepszą zdolnością do poprawy jakości gleb niż popioły lotne ze spalania węgla.

Alkaliczny odczyn popiołów umożliwia ich zastosowanie w celu odkwaszania gleb. Studium literatury potwierdza korzystne oddziaływanie ubocznych produktów spalania słomy na wzrost odczynu gleb oraz zwiększenie zawartości substancji odżywczych. Piekarczyk i wsp. [15, 16] potwierdzili korzystny wpływ aplikacji popiołu ze spalania słomy w dawkach rzędu 0,25–32,00 t/ha na wartość odczynu gleby. Dodatek największej testowanej ilości popiołu, tj. 8 t/ha pozwolił podwyższyć wartość pH gleby użytej w doświadczeniu o około 32%, z wartości pH = 6,5 do pH = 8,6 (ryc. 1). W innych swoich badaniach Piekarczyk [17] wykazał, że aplikacja popiołu ze spalania słomy wpływa na wzrost koncentracji składników pokarmowych w glebie, w szczególności na zawartość przyswajalnego fosforu.

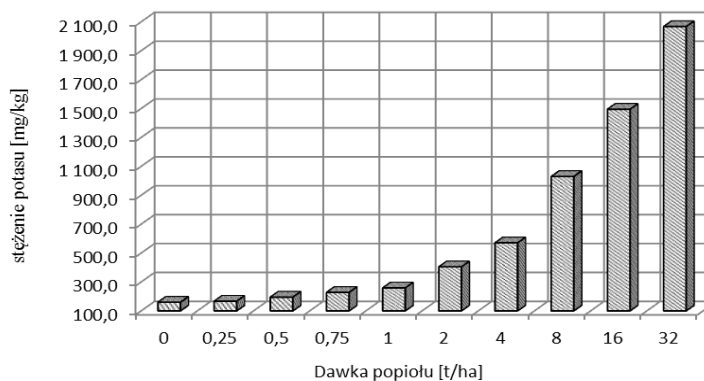
Ryc. 1. Wpływ popiołu ze spalania słomy na wzrost odczynu gleby



Źródło: Opracowanie własne na podstawie: M. Piekarczyk, K. Kotwica, D. Jaskulski, Wpływ stosowania popiołu ze słomy jęczmienia jarego na chemiczne właściwości gleby lekkiej, *Fragmenta Agronomica*, t. 28, nr 3, 2011, s. 91–99; M. Piekarczyk, D. Jaskulski, K. Kotwica, 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, s. 127–135.

Uboczne produkty spalania biomasy, w tym również słomy oddziałują na zwiększenie zasobności gleby w związku potasu i magnezu [15, 16]. Piekarczyk [17] wykazał, że aplikacja popiołu w dawce 8 t/ha pozwoliła zwiększyć stężenie potasu w glebie o ponad 235% (ryc. 2). Badania Piekarczyka potwierdziły również, że zastosowanie popiołu w aglomeracyjnych dawkach (>8 t/ha) umożliwia zmianę klasy zasobności gleby w Mg z niskiej do średniej [17].

Ryc. 2. Wpływ popiołu ze spalania słomy na zawartość potasu i magnezu w glebie

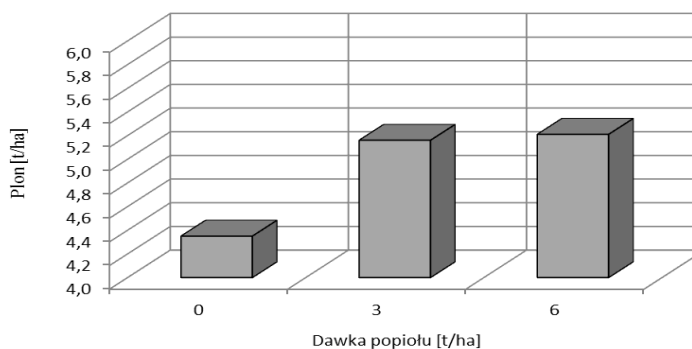


Źródło: Opracowanie własne na podstawie: M. Piekarczyk, Zawartość przyswajalnych form niektórych makro- i mikrośladników w glebie lekko nawożonej popiołem ze słomy pszenicy ozimej, *Fragmenta Agronomica*, t. 30, nr 1, 2013, s. 92–98.

Działanie popiołu ze spalania słomy w zabiegach rolniczych może być porównywalne, a nawet skuteczniejsze niż tradycyjnych nawozów mineralnych. Meller i Bilenda [10, 11] udowodnili pozytywne oddziaływanie ubocznych produktów spalania słomy na wartość pH i kwasowość hydrolityczną gleby. Stwierdzono również wzrost stężenia P, Mg i K w glebie po wprowadzeniu do niej popiołu [11]. Dodatkową korzyścią aplikacji popiołów w celach rolniczych jest brak późniejszego pogorszenia jakości gleby, co ma niekiedy miejsce w przypadku stosowania przez rolników mineralnych nawozów kwaśnych.

Uboczne produkty spalania stanowią substytut popularnych nawozów mineralnych. Zapałowska i wsp. [34] zbadali oddziaływanie popiołów ze spalania różnej biomasy roślinnej, w tym ze spalania słomy kukurydzianej na plonowanie zbóż. Dodatek wspomnianego materiału do gleby skutkował średnim wzrostem uzyskanego plonu w granicach 3÷19%, w zależności od zaaplikowanej dawki popiołu (ryc. 3).

Ryc. 3. Wpływ popiołu ze spalania słomy na plonowanie zbóż



Źródło: Opracowanie własne na podstawie: <http://ekoash.pl/> (dostęp: 22.07.2017)

Obecność składników pokarmowych niezbędnych dla wzrostu roślin powoduje, że składowanie ubocznych produktów spalania biomasy jest marnotrawieniem cennego surowca. Ze względu na zawartość składników nawozowych w ostatnich latach prowadzone są 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 [34]. Rezultaty badań potwierdziły pozytywny wpływ uzyskanego nawozu na plonowanie roślin, co w przyszłości może przyczynić się do popularyzacji stosowania popiołów w celach rolniczych [34]. Jednak ze względu na znaczną różnorodność biomasy, popiół przed aplikacją w celach rolniczych wymaga kontroli składu chemicznego celem nieprzekroczenia granicznych stężeń metali i substancji toksycznych zawartych w Ustawie o nawozach i nawożeniu [29].

5. Inne propozycje zagospodarowania ubocznych produktów spalania słomy

Specyficzne właściwości fizykochemiczne popiołów ze spalania słomy, m.in. wysokie straty prażenia przekraczające 10% oraz wysoką zawartość chloru, uniemożliwiają ich zastosowanie jako dodatek do produkcji materiałów budowlanych [18]. Z tego względu uboczne produkty spalania są stosowane przede wszystkim jako naturalny nawóz w zabiegach agrotechnicznych lub poddane procesowi składowania.

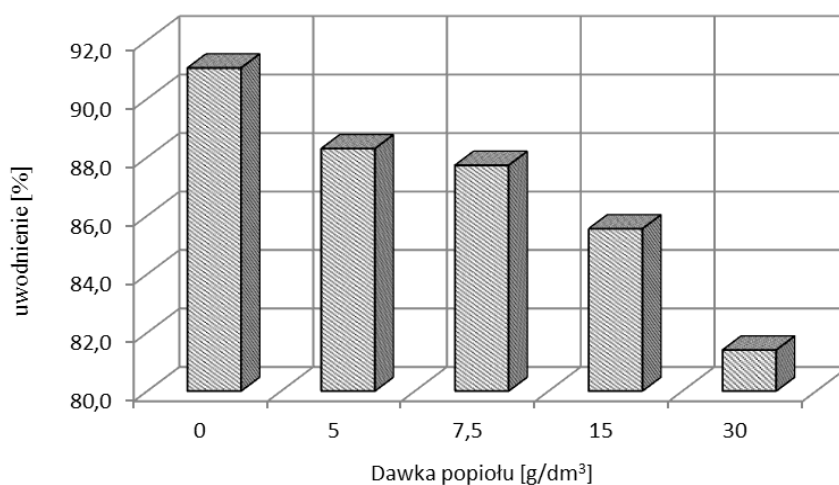
Popioły ze spalania słomy mogą być skutecznym reagentem w procesach przeróbki osadów ściekowych. Zgodnie z prawem elektrostatyki cząstki surowego osadu ściekowego o ujemnym ładunku elektrycznym tworzą stabilny układ o słabych zdolnościach filtracyjnych [27]. Aplikacja popiołów o średnicy poniżej 300 μm tworzy specyficzny rodzaj matrycy dla cząstek osadu ściekowego, co skutkuje poprawą właściwości sedymentacyjnych i odwadniających [9].

W ramach badań własnych zbadano skuteczność działania popiołów ze spalania słomy w aspekcie poprawy właściwości filtracyjnych osadów ściekowych z zastosowaniem filtra próżniowego. Dawki popiołów wyznaczono na podstawie studium literatury, jako stosunek masy popiołu do suchej masy osadów równy około 1:6, 1:4, 1:2 oraz 1:1. W przeliczeniu na objętość osadów, wyznaczone ilości popiołów odpowiadały dawkom 5; 7,5; 15 oraz 30 g/dm^3 . Efektywność działania ubocznych produktów spalania biomasy w procesach przeróbki osadów oceniono na podstawie wartości pH oraz uwodnienia placków osadowych po procesie filtracji próżniowej.

Rezultaty uzyskane przez Wójcik i wsp. [25] wykazały pozytywny wpływ aplikacji ubocznych produktów spalania słomy na poprawę przebiegu odwadnialności osadów ściekowych. Odnotowano, że kondycjonowanie osadów z użyciem popiołu ze spalania słomy pszenicznej zintensyfikowało efektywność procesu odwadniania biomasy średnio o 10% w porównaniu do surowego osadu ściekowego (ryc. 4). Surowe osady ściekowe charakteryzowały się uwodnieniem po procesie odwadniania z użyciem filtra ciśnieniowego na poziomie 91%, co pozwoliło na zaledwie 6% zmniejszenie zawartości wody w osadach względem początkowej ilości. Rezultaty

badania potwierdziły spadek wilgotności placków osadowych wraz ze zwiększającą się dawką popiołu. Aplikując uboczne produkty spalania słomy do osadów w dawkach 5; 7,5 oraz 15 g/dm³, uwodnienie zmniejszyło się odpowiednio o około 8,3; 8,6 oraz 10,4% względem osadu surowego (tab. 6). Największą skutecznością działania charakteryzowała się jednak najwyższa dawka popiołu, która skutkowała zmniejszeniem uwodnienia placka osadowego o około 14% do wartości 81,40%. Dodatkowo, aplikacja popiołu wpłynęła na znaczące zmniejszenie objętości osadów oraz skrócenie czasu filtracji o około 30% w porównaniu do czasu dla niekondycjonowanego osadu [25]. Uwodniony wpływ w aspekcie wspomagania odwadnialności osadów ściekowych powoduje, że popioły ze spalania słomy można rozważać jako i bardziej ekologiczny tańszy zamiennik innych substancji stosowanych w procesach mechanicznego kondycjonowania.

Ryc. 4. Wpływ popiołu ze spalania słomy na efektywność procesu odwadniania osadów ściekowych za pomocą filtracji próżniowej



Źródło: Opracowanie własne

Tab. 6. Wpływ aplikacji popiołu ze spalania słomy pszenicznej na efektywność procesu odwadniania osadów ściekowych z użyciem filtra próżniowego

Parametr	Dawka popiołu [g/ dm ³]				
	Osad surowy	5,0	7,50	15,00	30,00
Uwodnienie początkowe [%]	96,55	96,24	95,94	95,47	94,36
Uwodnienie po procesie odwadniania [%]	91,05	88,29	87,72	85,55	81,40
Zmniejszenie uwodnienia [%]	5,69	8,26	8,56	10,38	13,73
Zmniejszenie objętości [%]	54,88	79,90	81,92	82,92	84,92

Źródło: Opracowanie własne

Ze względu na obecność w swoim składzie alkalicznych składników, takich jak: wapń i sód, popioły ze spalania biomasy wykazują przydatność w procesach stabilizacji i higienizacji osadów ściekowych. Rezultaty badań Wójcik i wsp. [25] potwierdziły pozytywne oddziaływanie ubocznych produktów spalania słomy na wzrost odczynu osadów ściekowych. Dodatek popiołu ze spalania słomy w ilości 30 g/dm³ do osadów ściekowych wpłynął na wzrost wartości pH osadów o blisko 3 jednostki w porównaniu do surowych osadów (ryc. 5) [25]. Oddziaływanie ubocznych produktów spalania słomy na podwyższenie odczynu osadów może być jednym z czynników warunkujących zmniejszenie liczebności mikroorganizmów chorobotwórczych.

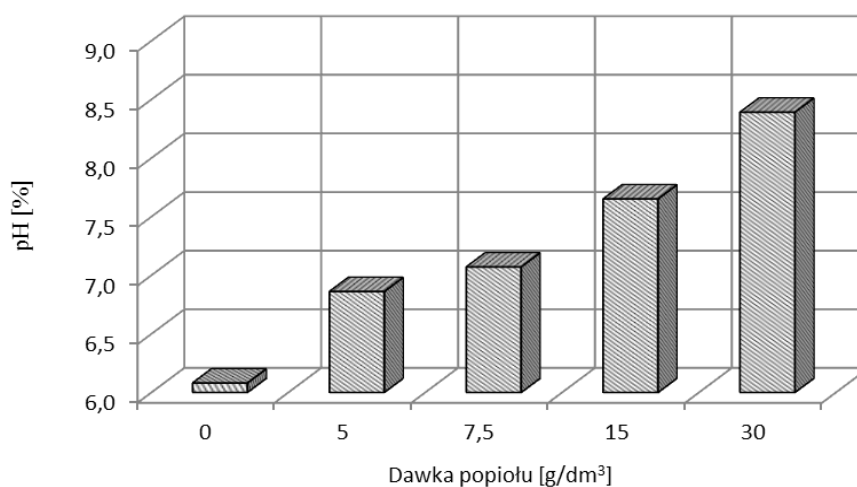
Badania dotyczące wpływu kondycjonowania i higienizowania osadów ściekowych popiołami ze spalania słomy znajdują się dotychczas w fazie testów laboratoryjnych i nie są stosowane na skalę przemysłową. Dlatego przed aplikacją odpadów energetycznych w gospodarce osadowej niezbędne jest przeprowadzenie technicznych badań w celu doboru optymalnej dawki materiału w oczyszczalniach ścieków.

Tab. 7. Wpływ aplikacji popiołu ze spalania słomy pszenicznej na odczyn osadów ściekowych

Parametr	Dawka popiołu [g/dm ³]				
	Osad surowy	5,0	7,50	15,00	30,00
pH początkowe [-]	6,08	6,08	6,08	6,08	6,08
pH końcowe [%]	-	6,86	7,07	7,65	8,39
Wzrost odczynu [-]	-	0,78	0,99	1,57	2,31

Źródło: Opracowanie własne

Ryc. 5. Wpływ popiołu ze spalania słomy na wzrost wartości pH osadów ściekowych

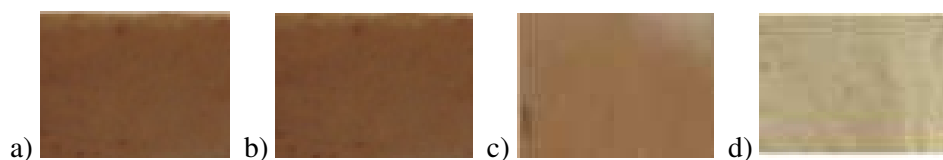


Źródło: Opracowanie własne

Osady ściekowe, ze względu na wysoki stopień uwodnienia, stwarzają dodatkowy problem z transportem. Aplikacja popiołu ze spalania słomy nadaje osadowi ziemistą konsystencję, dogodną do przewożenia i aplikacji za pomocą tradycyjnych rozrzutników nawozu [18]. Ze względu na zawartość substancji biogennej, uzyskaną mieszaninę osadowo-popiołową można stosować jako nawóz na plantacjach roślin energetycznych [23]. Niekonsumpcyjny charakter biomasy powoduje, że obecne w osadach ściekowych metale ciężkie zostają wyłączone z łańcucha troficznego człowieka [20].

Uboczne produkty spalania biomasy, w tym również słomy, mogą znaleźć zastosowanie w przemyśle ceramicznym. Badania Kizinievic i Kizinievic [7] wykazały przydatność popiołów ze spalania słomy do produkcji ceramiki o różnym przeznaczeniu. Uzyskane rezultaty potwierdziły wpływ aplikacji popiołów na wzrost gęstości, kurczliwości oraz wytrzymałości na ściskanie. Dodatek popiołu do masy ceramicznej działa również jako naturalny pigment, rozświetlając barwę ceramiki (ryc. 6). Pomimo możliwości recyklingu popiołów w przemyśle ceramicznym, metoda również nie doczekała się do tej pory komercyjnego zastosowania.

Ryc. 6. Wpływ popiołu ze spalania biomasy na barwę ceramiki w zależności od udziału popiołu; 0% (a), 5% (b), 20% (c) i 60% (d)



Źródło: Opracowano na podstawie: O. Kizinievic, V. Kizinievic, *Utilisation of wood ash from biomass for the production of ceramic products*, *Construction and Building Materials*, t. 127, 2016, s. 264–273.

6. Podsumowanie

Potrzeba ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz wzrastające wymagania środowiskowe przyczyniają się do popularyzacji alternatywnych źródeł energii. Szczególną rolę wśród wszystkich paliw energetycznych odgrywa biomasa, która stanowi obecnie trzecie co do wielkości źródło energii na świecie [36]. Wśród głównych zalet spalania biomasy wymienia się praktycznie „zerową” emisję dwutlenku węgla oraz dwutlenku siarki. Dodatkowo biomasa jest tanim, powszechnie dostępnym oraz łatwym w użytkowaniu materiałem, co pozwala ją traktować jako paliwo przyszłości.

Oprócz roślin wieloletnich uprawianych na plantacjach oraz odpadów z produkcji rolniczej, coraz częściej w celach energetycznych stosuje się słomę zbóż oraz rzepaku. Według Kwaśniewskiego [8] polskie rolnictwo produkuje około 29 mln ton słomy rocznie, którą stosuje się głównie jako podściółkę lub paszę dla zwierząt gospodarskich. Z kolei nadwyżki słomy, które szacowane są na około 11 mln ton rocznie, wykorzystuje się przede wszystkim do produkcji energii. Zdaniem Karczka i wsp. [6] 2 tony suchej słomy są równoważne 1 tonie węgla kamiennego. Niska gęstość nasypowa, która

utrudnia transport materiału oraz niejednorodność składu chemicznego, powoduje jednak, że słoma stosowana jest jako paliwo głównie w lokalnych kotłowniach [35].

Ubocznym produktem spalania słomy jest popiół, który może być stosowany jako cenny nawóz agrotechniczny poprawiający strukturę gleby i plonowanie roślin. Korzystne oddziaływanie popiołów ze spalania słomy wynika z zawartości składników pokarmowych dla roślin, w szczególności: potasu, fosforu, wapnia i magnezu. Dodatkowo, śladowa ilość metali ciężkich i substancji toksycznych w ubocznych produktach spalania powoduje, że ich aplikacja w zabiegach rolniczych jest uzasadniona pod względem ekologicznym oraz prawnym. Popiół ze spalania słomy może stanowić tańszy zamiennik dla popularnych na rynku nawozów potasowych i wapniowych, co pozwala w znacznym stopniu obniżyć wydatki rolników na zakup środków wspomagających produkcję rolniczą.

Specyficzne właściwości popiołów z biomasy, w tym ze spalania słomy, uniemożliwiają ich zastosowanie również w innych dziedzinach gospodarki. Badania wykazały przydatność popiołów ze spalania słomy w gospodarce osadami ściekowymi, jako środek wspomagający proces odwaniania i higienizacji osadów [23, 26]. Uboczne produkty spalania słomy mogą być również używane jako dodatek do produkcji ceramiki o różnym przeznaczeniu, nadając materiałowi kolor oraz poprawiając parametry wytrzymałościowe [7]. Niestety, wymienione metody recyklingu popiołów znajdują się dotychczas w fazie testów laboratoryjnych i nie doczekały się komercyjnego zastosowania.

Bibliografia

1. Faber A., Kuś J., Matyka M., *Uprawa roślin na potrzeby energetyki*, Wydawnictwo PKPP Lewiatan, Warszawa 2009, s. 32.
2. Głowacki J. (red.), *Mala Encyklopedia Rolnicza*, Państwowe Wydawnictwa Rolne i Leśne, Warszawa 1963, s. 38.
3. Hebda T., Złobecki A., *Wpływ wilgotności słomy na trwałość kinetyczną brykietów*, Inżynieria rolnicza, t. 6, nr 131, 2012, s. 45–52.
4. Kachel-Jakubowska M., *Możliwości wykorzystania odpadów poprodukcyjnych z rzepaku ozimego na cele energetyczne*, Inżynieria Rolnicza, t. 6, nr 131, 2011, s. 61–68.
5. Kabała C., Karczewska A., Kozak M., *Przydatność roślin energetycznych do rekultywacji i zagospodarowania gleb zdegradowanych*, Rolnictwo, t. 46, nr 576, 2014, s. 97–118.
6. Karcz H., Kantorek M., Grabowicz M., Wierzbiński K., *Możliwości wykorzystania słomy jako źródła paliwowego w kotłach energetycznych*, Piece Przemysłowe & Kotły, t. 11–12, 2013, s. 8–15.
7. Kizinievic O., Kizinievic V., *Utilisation of wood ash from biomass for the production of ceramic products*, Construction and Building Materials, t. 127, 2016, s. 264–273.
8. Kwaśniewski D., *Ocena produkcji i potencjalnych możliwości wykorzystania słomy do celów grzewczych na przykładzie powiatu żywieckiego*, Inżynieria Rolnicza, t. 6, nr 104, 2008, s. 113–119.
9. Masłoń A., *Wpływ materiałów pylistych na poprawę właściwości sedymentacyjnych osadu czynnego*, Instal, nr 4, 2015, s. 51–55.

10. Meller E., Bilenda E., *Wpływ popiołów ze spalania biomasy na właściwości fizykochemiczne gleb lekkich*, Polityka Energetyczna, 15, z. 3, 2012, s. 287–292.
11. Meller E., Bilenda E., *Wpływ nawożenia popiołami z biomasy na plon i pobieranie składników przez kukurydzę zwyczajną*, Polityka Energetyczna, 16, z. 3, 2013, s. 339–345.
12. Michalak J., *Wybrane aspekty oddziaływania elektrowni na środowisko*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 90, nr 10, 2014, s. 152–156.
13. Michalik M., *Biomasa zagrożona*, Nowa Energia, nr 4, 2013, s. 35.
14. Niedziółka I., Zuchniarz A., *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*, MOTROL, nr 8A, 2006, s. 232–237.
15. 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, s. 91–99.
16. 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, s. 127–135.
17. Piekarczyk M., *Zawartość przyswajalnych form niektórych makro- i mikroelementów w glebie lekkiej nawożonej popiołem ze słomy pszenicy ozimej*, Fragmenta Agronomica, t. 30, nr 1, 2013, s. 92–98.
18. Poluszyńska J., *Możliwości zastosowania popiołów ze spalania biomasy w gospodarowaniu osadami ściekowymi*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, nr 13, 2013, s. 49–59.
19. Shi R., Li J., Jiang J., Mehmood K., Liu Y., Xu R., Quian W., *Characteristics of biomass ashes from different materials and their ameliorative effects on acid soils*, Journal of Environmental Sciences, t. 55, 2017, s. 294–302.
20. Stachowicz F., Trzepieciński T., Wójcik M., Masłoń A., Niemiec W., Piech A., *Agricultural utilization of municipal sludge in willow plantation*, E3S Web of Conferences, nr 10, 2016, s. 1–6.
21. Uliasz-Bocheńczuk A., Pawluk A., Skierka J., *Wymywalność zanieczyszczeń z popiołów lotnych ze spalania biomasy*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management, t. 31, nr 3, 2015, s. 145–156.
22. Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G., *An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges*, Fuel, t. 105, 2013, s. 19–39.
23. Wójcik M., Stachowicz F., Masłoń A., *Możliwość wykorzystania popiołów lotnych w celu poprawy odwadniania osadów ściekowych*, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, t. 34, z. 64 (1), 2017a, s. 377–393.
24. Wójcik M., Stachowicz F., Masłoń A., *The application of biomass ashes for improvement of sewage sludge dewatering*, E3S Web of Conferences, t. 17, 2017b, s. 1–8.
25. Wójcik M., Stachowicz F., Masłoń A., *Analiza skuteczności metody mechanicznego kondycjonowania osadów ściekowych z zastosowaniem popiołów ze spalania biomasy*, Inżynieria i Ochrona Środowiska, t. 20, z. 3, 2017c, s. 295–304.
26. Wójcik M., Stachowicz F., Masłoń A., *Recycling of ashes from biomass-combustion power plant in sewage sludge management*, Materiały konferencyjne 9th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources and Efficiency EXPRES 2017d, Subotica, Serbia, s. 15–20.
27. Yan W., Panyue Z., Haibo Z., Guangming Z., Jianbo L., Jie Y., Wei F., Xiyang G., *Possibility of sludge conditioning and dewatering with rice husk biochar modified by ferric chloride*, Bio-resource Technology, nr 205, 2016, s. 258–263.

Akty prawne

28. Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych (Dz. U. z 2006 r. Nr 169, poz. 1199).
29. Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz. U. z 2007 r. Nr 147, poz. 1033).
30. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. z 2014 r., poz. 1923).

Źródła internetowe

31. <http://energia0.pl/oze/biomasa-i-biopaliwa/item/155-sloma-energetyczn-charakterystyka-ogolna> (dostęp: 22.07.2017).
32. <http://globenergia.pl/> (dostęp: 22.07.2017).
33. <http://www.ogrzewnictwo.pl/artykuly/sloma-jako-paliwo> (dostęp: 22.07.2017).
34. <http://ekoash.pl/> (dostęp: 22.07.2017).
35. <http://www.pwszprzemysl.edu.pl/biomasa-jako-zrodlo-energii-odnawialnej/> (dostęp: 22.07.2017).
36. <https://www.money.pl/gielda/wiadomosci/artukul/ure-produkcja-energii-elektrycznej-z-oze,245,0,2394101.html> (dostęp: 5.03.2018).