

Instytut Biotechnologii Przemysłu Rolno-Spożywczego  
im. prof. Waława Dąbrowskiego -  
Państwowy Instytut Badawczy

---

mgr inż. Łukasz Ściubak

## **Optymalizacja składu mieszanek biomasy i biomasy odpadowej dla procesu spalania w kotle instalacji energetycznej małej mocy**

Optimization of the Composition of Biomass and Waste Biomass Blends  
for Combustion in a Small-Scale Power Boiler

**Praca doktorska zrealizowana w ramach V edycji  
Programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego  
„Doktorat wdrożeniowy”**

This doctoral dissertation was carried out as part of the 5th edition  
of the Ministry of Science and Higher Education's  
“Implementation Doctorate” Programme

**Promotor:**

dr hab. inż. Andrzej Baryga, prof. Uczelni  
Politechnika Łódzka  
Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności  
Katedra Cukrownictwa i Zarządzania Bezpieczeństwem Żywności

**Opiekun pomocniczy w podmiocie współpracującym:**

dr inż. Wojciech Kosakowski  
Polmos Żyrardów Sp. z o.o.  
ul. Mickiewicza 1-3  
96-300 Żyrardów

Warszawa, 2025

## Streszczenie

### **Optymalizacja składu mieszanek biomasy i biomasy odpadowej dla procesu spalania w kotle instalacji energetycznej małej mocy**

Rozprawa doktorska podejmuje temat transformacji energetycznej w przemyśle rolno-spożywczym poprzez zastąpienie paliw kopalnych biomasą energetyczną pochodzenia roślinnego. Główne zagadnienia poruszane w pracy obejmują optymalizację składu mieszanin biomasy, sposób jej mieszania oraz podawania do zasobnika kotła biomasowego z uwzględnieniem konieczności zachowania stabilnych parametrów termodynamicznych produkowanej pary wodnej, niezbędnej w procesach technologicznych przemysłu rolno – spożywczego.

Sektor rolno-spożywczy, charakteryzujący się wysokim zapotrzebowaniem na energię cieplną i elektryczną, wytwarza znaczne ilości odpadów organicznych, które mogą być wykorzystane jako surowiec do produkcji energii odnawialnej. W pracy dokonano oceny efektywności i możliwości współspalania różnych rodzajów biomasy, będącej produktem ubocznym lub odpadem z przemysłu rolno-spożywczego i produkcji rolniczej. Analiza obejmuje także ocenę dostępności i jakości biomasy, jej składu fizykochemicznego, efektywności procesu spalania oraz wpływu na niezawodność pracy instalacji przemysłowych. Przeprowadzone badania mają na celu weryfikację hipotez dotyczących korzyści środowiskowych, technologicznych i biznesowych wynikających z wdrażania odnawialnych źródeł energii w sektorze rolno-spożywczym.

Studium przypadku zakładu Polmos Żyrardów Sp. z o.o. stanowi praktyczny kontekst dla realizowanych badań, w którym szczególny nacisk położono na zapewnienie stabilnych parametrów pracy układów parowych oraz racjonalne zagospodarowanie produktów ubocznych z procesów produkcyjnych. Rozprawa przedstawia możliwości zagospodarowania produktów spalania, takich jak popioły, w obszarze rolno – produkcyjnym, domykając tym samym obieg biomasy w przyrodzie co wpisuje się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym i zrównoważonego rozwoju.

Praca ma na celu wykazanie potencjału wykorzystania biomasy jako alternatywnego, niskoemisyjnego źródła energii, pozwalającego na redukcję emisji CO<sub>2</sub> oraz zwiększenie niezależności energetycznej i budowanie przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw przemysłu rolno-spożywczego.

**Słowa kluczowe:** biomasa, zrębka drewna, produkt uboczny, energia, zagospodarowanie.

## **Abstract**

### **Optimization of the Composition of Biomass and Waste Biomass Blends for Combustion in a Small-Scale Power Boiler**

This doctoral dissertation addresses the topic of energy transformation in the agri-food industry by replacing fossil fuels with plant-based energy biomass. The main issues discussed in the thesis include the optimization of biomass mixture composition, the method of its mixing and feeding into the biomass boiler hopper, with consideration for the necessity of maintaining stable thermodynamic parameters of the produced steam, which is essential for technological processes in the agri-food industry.

The agri-food sector, characterized by a high demand for heat and power generates significant amounts of organic waste that can be used as a raw material for renewable energy generation. The thesis evaluates the efficiency and feasibility of co-combustion of various types of biomass, which are by-products or waste from the agri-food and agricultural industries. The analysis also includes an assessment of the availability and quality of biomass, its physicochemical composition, the efficiency of the combustion process, and its impact on the reliability of industrial installations. The conducted research aims to verify hypotheses regarding the environmental, technological, and business benefits of implementing renewable energy sources in the agri-food sector.

The case study of the Polmos Żyrardów Sp. z o. o. plant provides a practical context for the research, with a particular emphasis on ensuring stable operating parameters of the steam systems and the rational management of by-products from production processes. The dissertation presents the possibilities of managing combustion products, such as ash, in the agricultural production area, thereby closing the biomass cycle in nature, which is in line with the principles of a circular economy and sustainable development.

The work aims to demonstrate the potential of using biomass as an alternative, low-emission energy source, allowing for a reduction in CO<sub>2</sub> emissions and an increase in energy independence and competitive advantage for companies in the agri-food industry.

**Keywords:** biomass, woodchip, by-product, energy, waste management

## SPIS TREŚCI

<b>WSTĘP .....</b>	<b>6</b>
<b>1. PALIWO BIOMASOWE W ZAKŁADZIE PRZEMYSŁOWYM.....</b>	<b>9</b>
1.1. Biomasa energetyczna w gospodarce obiegu zamkniętego .....	9
1.2. Konwersja energetyczna biomasy .....	22
1.3. Regulacje prawne dotyczące biomasy .....	25
1.4. Uwarunkowania środowiskowe jednostek energetycznych biomasowych.....	28
1.5. Produkty spalania biomasy możliwe do zagospodarowania w rolnictwie .....	35
<b>2. ROZEZNANIE RYNKU BIOMASY ENERGETYCZNEJ W OTOCZENIU FIRMY POLMOS ŻYRARDÓW ORAZ WYTYPOWANIE BIOMASY DO BADAŃ .....</b>	<b>51</b>
2.1. Przemysł rolno-spożywczy i klasyfikacja odpadów .....	51
2.2. Biomasa możliwa do wykorzystania w technologii spalania oraz analiza rynku biomasy .	56
<b>3. CEL PRACY I HIPOTEZY BADAWCZE .....</b>	<b>60</b>
3.1. Cel pracy.....	60
3.2. Zakres badań.....	60
3.3. Hipotezy badawcze.....	62
<b>4. MATERIAŁ BADAWCZY I METODYKA BADAŃ .....</b>	<b>63</b>
4.1. Rodzaj badań .....	63
4.2. Materiał badawczy.....	65
4.3. Metody badawcze .....	66
<b>5. ANALIZA TECHNICZNA KOTŁA PAROWEGO I OKREŚLENIE JEGO POTRZEB ENERGETYCZNYCH GWARANTUJĄCYCH STABILNĄ JEGO PRACĘ.....</b>	<b>68</b>
<b>6. WDROŻENIE WYNIKÓW BADAŃ W ZAKŁADZIE PRODUKCYJNYM POLMOS ŻYRARDÓW SP. Z O. O.....</b>	<b>69</b>
<b>7. WPŁYW POPIOŁÓW ZE SPALANIA BIOMASY NA WŁAŚCIWOŚCI GLEBY I PŁONOWANIE ŻYTA.....</b>	<b>70</b>
7.1. Ocena możliwości wykorzystania popiołów ze spalania różnego rodzaju biomasy do zagospodarowania na powierzchni ziemi .....	70
7.2. Badania wazonowe z wykorzystaniem popiołu – przygotowanie gleby.....	83
7.3. Długofalowy wpływ dozowanego popiołu na właściwości gleby .....	85
7.4. Badania wazonowe z wykorzystaniem popiołu – plonowanie żyta .....	92
7.5. Ocena wpływu nawożenia popiołami na uprawę żyta i na wydajność fermentacji zacierów żytnich.....	100

7.6. Ocena wpływu nawożenia popiołami na uprawę żyta i na zawartość lotnych związków w zacierach odfermentowanych. ....	109
<b>8. STWIERDZENIA I WNIOSKI .....</b>	<b>115</b>
<b>9. PODSUMOWANIE .....</b>	<b>116</b>
<b>10. SPIS LITERATURY .....</b>	<b>118</b>
<b>SPIS RYSUNKÓW .....</b>	<b>130</b>
<b>SPIS TABEL .....</b>	<b>130</b>

## WSTĘP

Współczesne wyzwania związane ze zmianami klimatycznymi, koniecznością ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz wyczerpywaniem się zasobów paliw kopalnych wymuszają transformację energetyczną w niemal wszystkich sektorach gospodarki, w tym również w przemyśle rolno-spożywczym. Sektor ten, będący jednym z kluczowych ogniw zapewniających bezpieczeństwo żywnościowe społeczeństw, charakteryzuje się wysokim zapotrzebowaniem na energię ciepłą i elektryczną, niezbędną do realizacji procesów technologicznych. Tradycyjnie wykorzystywane paliwa kopalne, takie jak węgiel, gaz ziemny czy olej opałowy, stanowią istotne źródło emisji dwutlenku węgla, przyczyniając się do destabilizacji naturalnego obiegu węgla w przyrodzie.

Współczesne przedsiębiorstwa coraz częściej stają wobec narastającego problemu racjonalnego gospodarowania odpadami. Odpady, poza oczywistym obciążeniem środowiskowym, stanowią również istotne wyzwanie finansowe, generując dodatkowe koszty związane z ich magazynowaniem, transportem i utylizacją. Nadmierna ilość wytwarzanych odpadów przyczynia się do degradacji środowiska, powodując m.in. zanieczyszczenie gleb, wód oraz powietrza. W związku z tym szczególnego znaczenia nabiera ich świadome i odpowiedzialne zagospodarowywanie, zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju.

W sektorze rolno-spożywczym niektóre frakcje odpadów mogą być traktowane nie jako problem i źródło kosztów, lecz jako wartościowy surowiec wtórny. Wykorzystanie ich jako źródła energii odnawialnej – tzw. zielonej energii – wpisuje się w model gospodarki cyrkularnej, zakładającej ponowne wprowadzanie materiałów do obiegu i maksymalne ograniczenie ilości odpadów. Takie podejście pozwala nie tylko zmniejszyć negatywny wpływ działalności przemysłowej na środowisko, ale również zwiększa efektywność energetyczną procesów produkcyjnych.

W poszukiwaniu alternatywnych, niskoemisyjnych źródeł energii, coraz większą uwagę zwraca się na biomasę. Może ona pochodzić z różnych źródeł – zarówno z rolnictwa i leśnictwa, jak i z przemysłowych odpadów organicznych powstających w procesach przetwórstwa spożywczego, papierniczego czy tartaczego. Biomasa jako paliwo odnawialne, znajduje zastosowanie w ciepłownictwie oraz energetyce, oferując potencjał do częściowego zastąpienia paliw kopalnych i zmniejszenia śladu węglowego przemysłu.

Jednym z kierunków umożliwiających ograniczenie negatywnego wpływu przemysłu rolno-spożywczego na środowisko naturalne jest wdrażanie rozwiązań opartych na odnawialnych źródłach energii, w szczególności na biomase energetycznej pochodzenia roślinnego. Zastosowanie biomasy jako głównego paliwa w procesach wytwarzania energii cieplnej pozwala nie tylko na redukcję emisji CO<sub>2</sub>, ale również na racjonalne wykorzystanie odpadów i produktów ubocznych powstających w trakcie produkcji rolno-spożywczej.

Zagadnienie efektywnego spalania biomasy oraz zapewnienia stabilnych parametrów termodynamicznych pary wodnej (temperatury i ciśnienia) stanowi istotny aspekt z punktu widzenia niezawodności i wydajności procesów technologicznych. Biomasa jako paliwo charakteryzuje się dużą różnorodnością pod względem pochodzenia, składu chemicznego oraz właściwości fizykochemicznych, co przekłada się na znaczne zróżnicowanie jej wartości opałowej. Parametr ten jest kluczowy w kontekście procesu spalania, ponieważ bezpośrednio wpływa na efektywność energetyczną oraz stabilność pracy kotła. Wahania w jakości paliwa mogą prowadzić do niestabilnych parametrów wytwarzanej pary wodnej, co z kolei negatywnie oddziałuje na przebieg procesów technologicznych w zakładach przemysłowych.

Utrzymanie stałego strumienia masy pary o ściśle określonych parametrach termodynamicznych (takich jak temperatura i ciśnienie) jest warunkiem niezbędnym dla niezawodnej pracy wielu instalacji przemysłowych, w tym szczególnie w sektorze rolno-spożywczym. Ustandaryzowanie mieszaniny biomasy, która spełniałaby te wymagania, stanowi istotne wyzwanie technologiczne. Wymaga to nie tylko precyzyjnej selekcji komponentów biopaliwa, ale również ciągłego monitoringu jakości surowca oraz odpowiedniego dostosowania parametrów pracy systemów spalania. Problem ten pozostaje jednym z kluczowych zagadnień w procesie wdrażania odnawialnych źródeł energii w przemyśle.

Właściwa kompozycja mieszaniny paliw biomasowych decyduje o jakości dostarczanej energii i możliwości jej praktycznego zastosowania w warunkach przemysłowych. Studium przypadku przedsiębiorstwa Polmos Żyrardów, które wdrożyło rozwiązania oparte na wykorzystaniu biomasy, stanowi wartościowy materiał do analizy rzeczywistych korzyści i wyzwań związanych z taką transformacją energetyczną.

Dodatkową wartość stanowi możliwość zagospodarowania produktów spalania biomasy, takich jak popiół, w innych gałęziach przemysłu, co dodatkowo przyczynia się do zamknięcia obiegu materiałowego i zmniejszenia presji środowiskowej. W kontekście

dążenia do gospodarki o obiegu zamkniętym, energetyczne wykorzystanie odpadów i produktów ubocznych przemysłu rolno-spożywczego wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju oraz budowy niskoemisyjnego systemu energetycznego.

Dążeniem niniejszej rozprawy doktorskiej jest ocena możliwości zastąpienia paliw kopalnych biomasą energetyczną w przemyśle rolno-spożywczym, ze szczególnym uwzględnieniem optymalizacji składu mieszanin biopaliw, analizy stabilności parametrów pracy układów parowych oraz oceny potencjału wykorzystania produktów ubocznych spalania. Praca podejmuje próbę weryfikacji hipotez dotyczących korzyści środowiskowych, energetycznych i ekonomicznych wynikających z transformacji energetycznej tego sektora.

Elektrociepłownia Polmos Żyrardów Sp. z o.o. wykorzystuje biomasę jako paliwo do produkcji pary, która służy do wytwarzania energii elektrycznej na małą skalę, a następnie zasila proces rektyfikacji. Zakład prowadzi gospodarkę obiegu zamkniętego, w tym posiada wysokosprawną instalację odzysku ciepła ze spalin na kotłowni i z procesów produkcyjnych na rektyfikacji. Opracowana technologia pozwala wytwarzać energię na potrzeby zakładu, zagospodarowywać produkty uboczne na cele energetyczne, a także budować niezależność energetyczną. Optymalne i racjonalne wykorzystywanie paliw biomasowych jest kluczowym zagadnieniem w kontekście ekonomicznego wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

# 1. PALIWO BIOMASOWE W ZAKŁADZIE PRZEMYSŁOWYM

## 1.1. Biomasa energetyczna w gospodarce obiegu zamkniętego

Biomasa roślinna to materiał organiczny pochodzący od roślin, który może być wykorzystany do różnych celów, w tym jako źródło energii, materiał budowlany, czy surowiec przemysłowy (koncepcja biorafinerii).

Biomasa roślinna jest odnawialna, ponieważ rośliny mogą być uprawiane i zbierane cyklicznie. W ciągu kilku lat, w zależności od rośliny, można uzyskać nowe zbiory. Na przykład, niektóre gatunki roślin energetycznych, takie jak trzcina cukrowa, kukurydza czy wierzba energetyczna, rosną w tempie umożliwiającym ich szybkie wykorzystanie. Co więcej, rośliny mogą być sadzone (lub tak jak krzewy odrastają) ponownie po każdym zbiorze, co zapewnia stałą dostępność surowca, a przy odpowiednim zarządzaniu pozwala na utrzymanie równowagi w ekosystemie. Biomasa roślinna, jako materiał odnawialny, może być wykorzystywana w sposób zrównoważony, co oznacza, że jej pozyskiwanie nie wyczerpuje zasobów naturalnych. Ważne jest jednak, aby uprawa roślin energetycznych nie odbywała się kosztem produkcji żywności. Dzięki odpowiedniemu zarządzaniu, biomasa roślinna może być cennym źródłem surowców, które są zarówno przyjazne środowisku, jak i ekonomiczne.

Wykorzystanie biomasy roślinnej na cele energetyczne to proces konwersji organicznych materiałów roślinnych w różne formy energii użytecznej, takie jak ciepło, elektryczność lub biopaliwa. Biomasa jest uznawana za odnawialne źródło energii, ponieważ rośliny, z których pochodzi biomasa, pochłaniają dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) z atmosfery podczas procesu fotosyntezy, co sprawia, że jej spalanie lub przetwarzanie na energię nie przyczynia się do wzrostu netto emisji  $\text{CO}_2$  w atmosferze. Wiązanie węgla i powstawanie biomasy są ze sobą ściśle powiązane. Wiązanie węgla to proces, w którym rośliny przekształcają dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) z atmosfery w organiczne związki w trakcie procesu fotosyntezy. Powstawanie biomasy to proces tworzenia masy roślinnej w wyniku produkcji związków organicznych, które stanowią jej budulec. Wiązanie węgla jest kluczowym etapem w tworzeniu biomasy. Wiązanie węgla przebiega w oparciu o przyswajanie dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) z atmosfery i wodoru z wody ( $\text{H}_2\text{O}$ ) z gleby. Z wykorzystaniem energii słonecznej roślina zielona przekształca te substancje w glukozę ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) i tlen ( $\text{O}_2$ ).

Cały proces fotosyntezy można zapisać równaniem chemicznym:



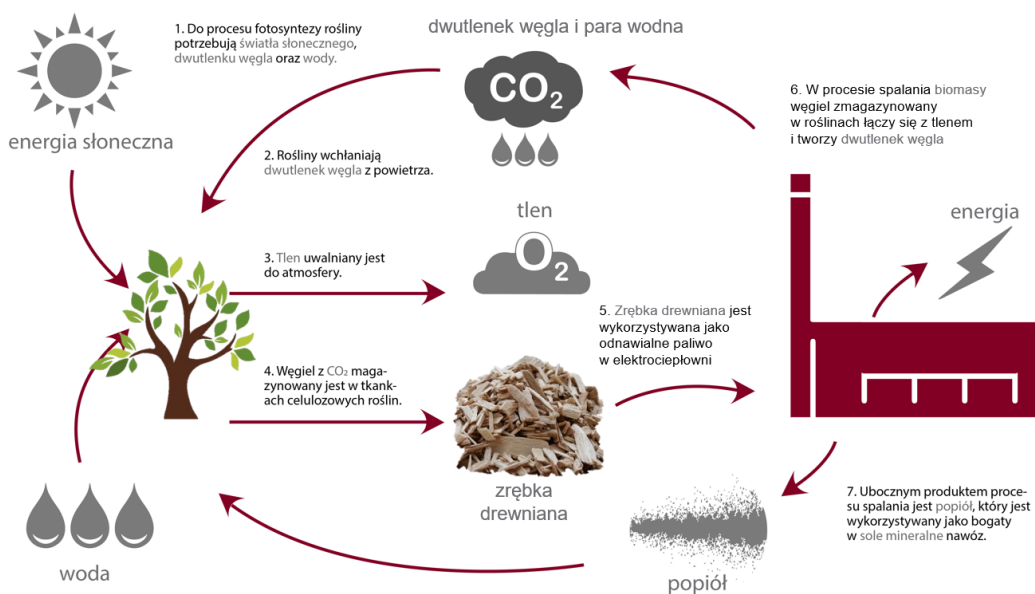
Glukoza jest cukrem, który rośliny wykorzystują do produkcji energii oraz do budowy różnych struktur. Glukoza jest przekształcana w inne związki organiczne, takie jak skrobia (magazyn energii) czy celuloza (główna substancja budulcowa ściany komórkowej roślin zielonych).

Biomasa roślinna powstaje dzięki procesowi fotosyntezy. Rośliny wytwarzają organy, takie jak liście, łodygi, korzenie czy owoce, które są zbudowane z węglowodanów (głównie celulozy i skrobi) i innych związków organicznych. Rośliny magazynują węgiel w swojej biomacie w formie różnych związków organicznych. Biomasa roślinna może gromadzić się przez długi czas (liczony nawet w tysiącach lat), szczególnie w lasach, torfowiskach czy innych ekosystemach, które są w stanie magazynować węgiel w glebie w postaci roślinnej materii organicznej. Wzrost ilości biomasy roślinnej jest bezpośrednio związany z intensywnością wiązania węgla im więcej dwutlenku węgla rośliny przetwarzają, tym większa jest ich biomasa.

Zagospodarowywanie odpadów organicznych oraz produktów ubocznych z rolnictwa i przemysłu rolno – pożywczego stanowi duży potencjał materiałowy do wykorzystania energetycznego. Te odpady roślinne, które byłyby zwykle traktowane jako niepotrzebne, mogą być przetwarzane i ponownie wykorzystane do produkcji energii, biopaliw czy nawozów. Zamiast trafić na wysypisko stają się cennym surowcem, zamykając cykl ich wykorzystania i zmniejszając ilość odpadów w środowisku naturalnym.

Rozpatrując te aspekty należy wziąć pod uwagę szybkość tworzenia biomasy, która jest zależna od różnych czynników, takich jak dostępność światła, wody, temperatury, jakości gleby oraz koncentracji CO<sub>2</sub> w atmosferze. Zwiększenie poziomu CO<sub>2</sub> w atmosferze może stymulować fotosyntezę i zwiększyć tempo wiązania węgla, co prowadzi do szybszego wzrostu roślin i większej produkcji biomasy.

Patrząc na zjawisko fotosyntezy szerzej można dojść do wniosku, że biomasa roślinna pełni funkcję magazynu węgla, co jest szczególnie istotne w kontekście zmian klimatycznych. Rośliny i ich biomasa pomagają utrzymywać równowagę w obiegu węgla w ekosystemie, zmniejszając stężenie CO<sub>2</sub> w atmosferze. Przechowywanie węgla w roślinach i glebie. Rośliny mogą działać jako pochłaniacz węgla i spowolnić globalne ocieplenie.



**Rysunek 1.** Obieg dwutlenku węgla w przyrodzie (Źródło: Opracowanie własne).

Biomasa roślinna i gospodarka obiegu zamkniętego to połączenie, które sprzyja zrównoważonemu rozwojowi, ograniczając wytwarzanie odpadów i maksymalizując wykorzystanie zasobów. Gospodarka obiegu zamkniętego stanowi model, który opiera się na idei minimalizacji odpadów, ponownym wykorzystaniu surowców oraz zapewnieniu ich jak najdłuższego cyklu życia. Biomasa roślinna jako odnawialny surowiec, doskonale wpisuje się w tę koncepcję, ponieważ umożliwia zamknięcie cyklu produkcji i konsumpcji w sposób, który jest korzystny zarówno dla środowiska, jak i gospodarki.

Korzyści z połączenia biomasy roślinnej z gospodarką obiegu zamkniętego to także zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych. Wykorzystanie biomasy roślinnej do produkcji energii czy biopaliw może pomóc w zmniejszeniu emisji  $\text{CO}_2$  w porównaniu do paliw kopalnych, tworząc bardziej zrównoważony łańcuch dostaw energii. Gospodarka obiegu zamkniętego to również szanse na niezależność i samowystarczalność energetyczną. (Zarębska, 2017) Zmniejszenie zależności od surowców kopalnych poprzez wykorzystanie biomasy roślinnej do produkcji energii, biopaliw czy biomateriałów zmniejsza zapotrzebowanie na paliwa kopalne, przyczyniając się do bardziej zrównoważonego rozwoju przemysłowego.

Biomasa roślinna może być wykorzystywana w sposób zrównoważony do produkcji energii, biopaliw, biomateriałów, nawozów i innych produktów, jednocześnie zmniejszając produkcję odpadów i minimalizując przez to wpływ na środowisko. Przetwarzanie biomasy roślinnej w ramach obiegu zamkniętego sprzyja bardziej przyjaznemu środowisku modelowi produkcji, przyczyniając się do ochrony zasobów naturalnych, zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych i wspierania bioróżnorodności.

Pod względem składu chemicznego biomasa charakteryzuje się wyższym udziałem pierwiastków takich jak tlen i wodór oraz niższym udziałem węgla w porównaniu do paliw kopalnych, takich jak węgiel kamienny, co wpływa na jej właściwości spalania oraz potencjał emisyjny.

Przykładowo, wartość opałowa słomy żółtej wynosi około 14,3 MJ/kg, drewna opałowego około 13 MJ/kg, natomiast węgla kamiennego aż 29,3 MJ/kg. Oznacza to, że pod względem energetycznym jedna tona węgla kamiennego odpowiada mniej więcej dwóm tonom drewna opałowego lub słomy żółtej.

Zrębka leśna		Drewno odpadowe	
Zrębka agro		Kora	
Wytłoki owocowe, warzywne		Wysłodki	
Odpady z przetwórstwa		Wywar pogorzelniany	
Młóto		Rdzenie kolb kukurydzy	
Pestki z owoców		Łupiny z orzechów	
Palet z łuski słonecznika		Palet z wierzby lub trawy	

**Rysunek 2.** Przykładowe rodzaje biomasy energetycznej (Źródło: Opracowanie własne).

W obliczu narastających globalnych wyzwań związanych ze zmianami klimatycznymi, degradacją środowiska oraz koniecznością radykalnej redukcji emisji gazów cieplarnianych, biomasa roślinna zyskuje na znaczeniu jako istotny komponent zrównoważonego systemu energetycznego. Stanowi ona jedno z kluczowych odnawialnych źródeł energii, którego wykorzystanie może znacząco przyczynić się do ograniczenia zależności od paliw kopalnych oraz zmniejszenia antropogenicznej presji na klimat (IPCC, 2022; Slade i in, 2014).

Z punktu widzenia bilansu węglowego, biomasa uchodzi za źródło energii o potencjalnie neutralnym wpływie na atmosferyczne stężenie dwutlenku węgla. Emisje powstałe podczas jej spalania mogą być bowiem równoważone przez proces fotosyntezy, w trakcie którego rośliny pochłaniają CO<sub>2</sub> z atmosfery w fazie wzrostu (McKendry, 2002a; Kaltschmitt i in. 2016). Ten pozorny cykl zamknięty, określany mianem neutralności węglowej, staje się fundamentem argumentacji na rzecz szerszego wdrażania technologii bioenergetycznych.

Korzyści wynikające z energetycznego wykorzystania biomasy są wielowymiarowe. Obejmują m.in. redukcję emisji gazów cieplarnianych, dywersyfikację źródeł energii, wzrost bezpieczeństwa energetycznego, a także rozwój gospodarki obiegu zamkniętego i wspieranie lokalnych rynków pracy (Faaij, 2006a; European Commission, 2021). Niemniej jednak, implementacja tego typu rozwiązań wiąże się również z szeregiem wyzwań technologicznych, środowiskowych i społeczno-ekonomicznych. Wśród nich wymienić można m.in. konkurencję o grunty rolne, potencjalną utratę bioróżnorodności, emisje zanieczyszczeń powietrza związane z nieefektywnym spalaniem biomasy, jak również potrzebę rozwoju infrastruktury logistycznej i magazynowej.

W literaturze naukowej coraz częściej podkreśla się konieczność holistycznej oceny cyklu życia (LCA – *Life Cycle Assessment*) rozwiązań bioenergetycznych, uwzględniającej cały łańcuch wartości – od produkcji surowca, przez przetwarzanie i transport, aż po końcowe wykorzystanie energii (Berndes, i in., 2003; van Dam i in., 2008). Takie podejście umożliwia identyfikację rzeczywistych korzyści środowiskowych oraz potencjalnych zagrożeń związanych z niewłaściwym zarządzaniem zasobami biomasy.

Biomasa roślinna jawi się jako ważny element strategii dekarbonizacji sektora energetycznego. Jej rola w kontekście transformacji energetycznej powinna być jednak analizowana nie tylko przez pryzmat emisji CO<sub>2</sub>, ale również z uwzględnieniem szerszego kontekstu ekologicznego, gospodarczego i społecznego (Pająk, 2015).

Głównym argumentem przemawiającym za wykorzystaniem biomasy jako źródła energii jest redukcja emisji dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>). Kluczową rolę odgrywa tutaj założenie, że CO<sub>2</sub> emitowany podczas spalania biomasy jest równoważony przez ten, który rośliny pochłaniają z atmosfery w procesie fotosyntezy w trakcie swojego wzrostu (Cherubini i Strømman, 2011). Z tego względu biomasa bywa klasyfikowana jako źródło energii o neutralnym bilansie węglowym. Autorzy wskazują również na dodatkowe korzyści środowiskowe wynikające z jej wykorzystania. Spalanie biomasy prowadzi zwykle do niższych emisji dwutlenku siarki (SO<sub>2</sub>), ponieważ zawartość siarki w większości roślinnych surowców energetycznych jest znacznie niższa niż w przypadku węgla kamiennego czy brunatnego (Cherubini i Strømman, 2011).

W kontekście technologii konwersji energetycznej, najprostszym i jednocześnie najpowszechniej stosowanym rozwiązaniem jest bezpośrednie spalanie biomasy, zwłaszcza w postaci peletów, brykietów czy zrębków drzewnych (McKendry, 2002b). Jednakże z uwagi na potrzebę minimalizacji kosztów inwestycyjnych oraz optymalizacji wykorzystania istniejącej infrastruktury energetycznej, literatura techniczna i inżynierska coraz częściej wskazuje na współspalanie biomasy z paliwami kopalnymi – przede wszystkim z węglem – jako rozwiązanie przejściowe o dużym potencjale wdrożeniowym (Baxter, 2011).

Z ekonomicznego punktu widzenia, przetwarzanie surowej biomasy w formy stałe o wyższej gęstości energetycznej – takie jak pelety – stanowi istotny krok w kierunku zwiększenia efektywności logistycznej łańcucha dostaw. Zwiększenie gęstości energetycznej umożliwia redukcję kosztów transportu i magazynowania, co jest kluczowe dla wykorzystania biomasy w elektrociepłowniach i systemach grzewczych na skalę przemysłową (Mani, i in., 2006).

Pomimo licznych zalet środowiskowych i energetycznych, wykorzystanie biomasy napotyka na szereg istotnych barier technicznych, logistycznych i środowiskowych, które ograniczają jej efektywność oraz szerokie wdrażanie w systemach energetycznych. Jednym z podstawowych problemów jest niska gęstość energetyczna oraz wysoka zawartość wilgoci w surowcach biomasowych w porównaniu do paliw kopalnych. Te właściwości fizyczne znacząco zwiększają koszty logistyczne, w tym transportu i magazynowania, zwłaszcza na dużą skalę. Konieczność wcześniejszego suszenia oraz przetwarzania biomasy – np. poprzez peletowanie lub brykietowanie – w celu zwiększenia gęstości energetycznej, wpływa na wzrost kosztów operacyjnych i emisyjnych (McKendry, 2002a; Mani, i in., 2006).

Drugim istotnym wyzwaniem są problemy eksploatacyjne w urządzeniach energetycznych, wynikające ze specyfiki chemicznej biomasy. W przeciwieństwie do węgla, biomasa często zawiera znaczne ilości chloru oraz metali alkalicznych, takich jak potas (K) i sód (Na), co może prowadzić do szeregu negatywnych zjawisk podczas spalania. Wysoka reaktywność tych pierwiastków sprzyja powstawaniu osadów szlaku na powierzchniach wymiany ciepła, korozji wysokotemperaturowej oraz spiekaniu popiołów. Skutkiem tych procesów jest obniżenie sprawności cieplnej instalacji, zwiększone koszty utrzymania oraz ryzyko uszkodzeń technicznych (Vassilev i in., 2010).

Co więcej, rosnąca skala wykorzystania biomasy generuje pytania dotyczące jej zrównoważonego rozwoju. Intensywna produkcja biomasy może prowadzić do konkurencji z sektorem rolnictwa spożywczego, wylesiania, utraty bioróżnorodności oraz pogorszenia jakości gleb i wód. Z tego względu, coraz większe znaczenie przypisuje się prowadzeniu oceny cyklu życia (LCA) oraz wdrażaniu certyfikowanych systemów zarządzania biomasą, które mają na celu zagwarantowanie, że produkcja i wykorzystanie surowców biomasowych nie odbywa się kosztem środowiska ani lokalnych społeczności (Cherubini i Strømman, 2011; van Dam i in., 2008).

Jednym z głównych przedmiotów debaty w kontekście bioenergii są tzw. pośrednie emisje wynikające ze zmiany sposobu użytkowania gruntów (ILUC – *indirect land-use change*). Badania, takie jak te autorstwa Searchingera i współpracowników (2008), wskazują, że przeznaczanie użytków rolnych pod uprawy roślin energetycznych – zwłaszcza w przypadku biopaliw pierwszej generacji – może prowadzić do wylesiania lub degradacji gleb w innych regionach świata, co w konsekwencji prowadzi do emisji znacznych ilości dwutlenku węgla. Tym samym, potencjalne korzyści klimatyczne zostają częściowo lub całkowicie zniwelowane.

Ta perspektywa skłoniła środowiska naukowe i decydentów do większego zainteresowania się biomasą drugiej i trzeciej generacji, czyli surowcami, które nie konkurują bezpośrednio z produkcją żywności. Obejmuje to m.in. odpady rolnicze i leśne, osady ściekowe, frakcje biodegradowalne odpadów komunalnych oraz algi (Faaij, 2006b). Tego typu surowce stanowią bardziej zrównoważoną alternatywę, zmniejszając presję na grunty i systemy ekologiczne.

Równoległe do zmian w podejściu surowcowym, trwają intensywne prace nad udoskonaleniem technologii konwersji biomasy, tak aby poprawić jej właściwości paliwowe i ograniczyć negatywne skutki eksploatacyjne. Wśród rozwiązań termochemicznych

szczególnością uzyskuje toryfikacja – proces łagodnej pirolizy biomasy w temperaturze 200–300°C w warunkach beztlenowych. Jak wskazują badania (Torp i in., 2019), toryfikacja zwiększa gęstość energetyczną biomasy, obniża jej wilgotność i zawartość lotnych składników, co czyni ją bardziej podobną do węgla kamiennego pod względem parametrów spalania. Tak przetworzona biomasa jest łatwiejsza w transporcie, magazynowaniu i współspalaniu z węglem.

W zakresie współspalania, prowadzone są badania mające na celu określenie optymalnych proporcji biomasy i paliw kopalnych, które pozwalają na maksymalizację efektywności energetycznej przy jednoczesnej minimalizacji emisji i problemów eksploatacyjnych, takich jak korozja czy osadzanie szlaki. Równolegle rozwijane są zaawansowane modele komputerowe i symulacyjne, które umożliwiają prognozowanie zachowania mieszanek paliwowych w różnych warunkach pracy kotłów. Pozwala to na projektowanie bardziej odpornych i wydajnych instalacji energetycznych (Huber i in., 2006).

Podsumowując, wykorzystanie biomasy jako alternatywy dla paliw kopalnych stanowi strategiczny element transformacji energetycznej. Pomimo szeregu wyzwań, takich jak problemy logistyczne, niska jakość energetyczna surowca czy wpływ na użytkowanie gruntów, kierunek ten zyskuje coraz większe wsparcie technologiczne i regulacyjne. Przykładem jest unijna Dyrektywa 2009/28/WE, która wyznacza cele w zakresie udziału energii odnawialnej, promując jednocześnie rozwój zrównoważonych systemów bioenergetycznych w krajach członkowskich.

Współspalanie (ang. *co-firing*) to technika polegająca na jednoczesnym spalaniu dwóch lub więcej rodzajów paliw w jednej instalacji. Najczęściej odnosi się ona do technologii łączącej spalanie paliwa kopalnego, zwykle węgla, z biomasą, co pozwala na częściową dekarbonizację bez konieczności całkowitej przebudowy istniejącej infrastruktury energetycznej (Baxter, 2011).

Coraz częściej jednak współspalanie analizowane jest również w kontekście wielopaliwowego spalania biomasy, obejmującego różne rodzaje surowców biomasowych, takich jak zrębki drzewne, odpady rolnicze, osady ściekowe, czy biopaliwa z alg. Takie podejście umożliwia lepsze dostosowanie parametrów paliwowych do specyfiki instalacji, ograniczenie problemów eksploatacyjnych (np. osadzania szlaki czy korozji) oraz zwiększenie elastyczności surowcowej zakładów energetycznych (Vassilev i in., 2010).

Wielopaliwowe współspalanie biomasy pozwala także na bardziej efektywne wykorzystanie lokalnie dostępnych zasobów, co przekłada się na niższe koszty transportu i magazynowania. Ponadto, dobór odpowiednich proporcji i typów biomasy może zoptymalizować skład chemiczny mieszanki paliwowej, redukując zawartość pierwiastków problematycznych (np. chloru, sodu, potasu), które odpowiadają za powstawanie osadów i korozję. W badaniach eksperymentalnych i modelowych analizuje się obecnie różne scenariusze współspalania biomasy w celu określenia optymalnych warunków procesu zarówno pod względem efektywności energetycznej, jak i stabilności operacyjnej (Huber, i in. 2006).

Dodatkowym atutem współspalania, w szczególności z udziałem biomasy termicznie przetworzonej (np. poddanej toryfikacji), jest poprawa właściwości spalania – m.in. większa jednorodność paliwa, niższa zawartość wilgoci i lotnych związków organicznych, a także lepsza przewidywalność zachowania paliwa w kotle (Torp i in., 2019). Strategie współspalania, zwłaszcza w systemach przemysłowych, mogą więc odegrać istotną rolę w etapie przejściowym transformacji energetycznej, zanim możliwe będzie pełne przejście na zeroemisyjne źródła energii.

Literatura naukowa wskazuje na szereg korzyści wynikających z łączenia różnych rodzajów biomasy w procesach współspalania. Jedną z kluczowych zalet takiego podejścia jest optymalizacja składu chemicznego mieszanki paliwowej oraz poprawa parametrów energetycznych, takich jak wartość opałowa czy zawartość popiołu.

Różne typy biomasy charakteryzują się znacznymi różnicami pod względem właściwości fizykochemicznych. Zawartość wilgoci, frakcja mineralna, ilość popiołu oraz stężenie pierwiastków takich jak potas (K), chlor (Cl), siarka (S) czy krzem (Si) wpływają nie tylko na efektywność procesu spalania, ale także na jego stabilność oraz awaryjność instalacji. Współspalanie różnych gatunków biomasy umożliwia uśrednienie niepożądanych właściwości jednego paliwa poprzez dodanie drugiego, bardziej stabilnego składnikowo (Baxter, 2011; Vassilev i in., 2010).

Przykładowo, słoma zbóż jest surowcem bogatym w potas i chlor, co może prowadzić do problemów eksploatacyjnych, takich jak powstawanie zgorzeli, osadzanie się szlaki oraz korozja wysokotemperaturowa. Z kolei zrębki drzewne mają zwykle niższą zawartość popiołu i chloru, natomiast są bogate w krzemionkę ( $\text{SiO}_2$ ). Jak pokazują badania, krzem może reagować z potasem i chlorem, tworząc niskotopliwe silikaty i chlorki potasu

w formie stałej, które są mniej szkodliwe dla powierzchni wymiany ciepła i zmniejszają intensywność korozji (Baxter, 2011; Vassilev i in., 2010).

Tego rodzaju reakcje neutralizujące przyczyniają się do ograniczenia odkładania się osadów, zwiększenia trwałości kotłów oraz podniesienia ogólnej sprawności procesu. Dodatkowo, mieszanie biomasy o wyższej wilgotności z suchym surowcem (np. pelety drzewne) umożliwia lepszą kontrolę parametrów spalania, a tym samym bardziej stabilną pracę instalacji energetycznej. Z perspektywy operacyjnej, strategia współspalania różnych rodzajów biomasy stanowi zatem praktyczne narzędzie do zarządzania jakością paliwa i optymalizacji procesu w warunkach zmiennej dostępności surowców.

Biomasa pochodząca z roślin zielnych, takich jak trawy czy słoma, charakteryzuje się niską gęstością nasypową, wysoką zawartością wilgoci oraz zmienną granulacją, co sprawia, że jej spalanie jest często niestabilne i mniej przewidywalne w porównaniu do biomasy drzewnej. Nieregularna struktura fizyczna tego typu surowców prowadzi do problemów z podawaniem paliwa, nierównomiernym dopływem powietrza oraz fluktuacjami temperatury w komorze spalania, co może skutkować niższą efektywnością konwersji energii (Wasilewski i Zając, 2015).

Jednym z rozwiązań tych problemów jest łączenie biomasy roślin zielnych z bardziej stabilnym paliwem, takim jak pelety drzewne, zrębki czy trociny. Taka mieszanka paliwowa wykazuje korzystniejsze właściwości fizyczne – m.in. większą jednorodność, niższą wilgotność oraz wyższą gęstość energetyczną – co przekłada się na bardziej równomierny przebieg procesu spalania i zwiększoną sprawność kotła. W efekcie poprawia się nie tylko efektywność energetyczna, ale także stabilność pracy instalacji oraz przewidywalność emisji zanieczyszczeń.

Dodatkowym atutem wielopaliwowego spalania biomasy jest zwiększona elastyczność operacyjna zakładów energetycznych. Elektrownie i ciepłownie nie muszą być uzależnione od jednego, często sezonowo dostępnego źródła paliwa, jakim jest np. słoma zbóż, lecz mogą korzystać z szerokiego spektrum surowców: od odpadów rolniczych (łodygi kukurydzy, rdzenie kolb, liście, resztki poźniwne) po różne frakcje biomasy leśnej (zrębki, trociny, kora). Taka dywersyfikacja źródeł biomasy zwiększa odporność systemu na wahania podaży i cen surowców, co jest szczególnie istotne w kontekście rosnącego zapotrzebowania na odnawialne źródła energii oraz niestabilności rynków surowcowych (Wasilewski i Zając, 2015).

Pomimo licznych korzyści związanych z wielopaliwowym spalaniem biomasy, takich jak elastyczność surowcowa, optymalizacja parametrów spalania czy zwiększona dostępność paliw, proces ten wiąże się również z szeregiem poważnych wyzwań technicznych i środowiskowych.

Jednym z najistotniejszych problemów eksploatacyjnych pozostaje wysoka korozyjność środowiska spalania oraz tendencja do tworzenia osadów na powierzchniach wymiany ciepła. W szczególności biomasa pochodzenia rolniczego (np. słoma, łęty ziemniaczane, odpady kukurydziane) charakteryzuje się wysoką zawartością metali alkalicznych (potasu i sodu) oraz chloru. W warunkach wysokotemperaturowych związki te mogą przechodzić w formy lotne, tworząc m.in. chlorki potasu i sodu, które kondensują na chłodniejszych częściach kotła i prowadzą do intensywnej korozji (Nussbaumer, 2003). Skutkiem tego jest spadek sprawności instalacji, skrócenie żywotności elementów konstrukcyjnych oraz zwiększone koszty eksploatacyjne.

Badania wskazują, że odpowiedni dobór proporcji mieszanki paliwowej oraz techniczne modyfikacje kotłów – np. zastosowanie materiałów odpornych na korozję, optymalizacja temperatury spalania czy zmiana geometrii przepływu spalin – są kluczowe dla minimalizacji zagrożeń związanych z osadzaniem i korozją (Nussbaumer, 2003; Vassilev i in., 2010).

Kolejnym istotnym wyzwaniem jest zarządzanie procesem paliwowym, ponieważ biomasa pochodząca z różnych źródeł znacznie różni się pod względem granulacji, wilgotności, gęstości nasypowej oraz wartości opałowej. Te różnice utrudniają jednorodne mieszanie paliw, a także precyzyjne podawanie ich do komory spalania. Z tego względu konieczne jest stosowanie zaawansowanych systemów magazynowania, dozowania i transportu paliw, które pozwalają na zachowanie stałości parametrów procesu energetycznego (Płóciennik i in., 2018).

Dodatkowo, spalanie mieszanek biomasy może wpływać na zmianę profilu emisji zanieczyszczeń, takich jak tlenki azotu (NO<sub>x</sub>), pyły zawieszone, oraz substancje organiczne i kwaśne związki gazowe. Ostateczny poziom emisji zależy od składu chemicznego paliwa, temperatury i sposobu prowadzenia spalania. Dlatego też literatura techniczna podkreśla konieczność optymalizacji parametrów procesu oraz rozwoju technologii oczyszczania spalin, dostosowanych do zmiennego charakteru paliw biomasowych (Płóciennik i in., 2018).

Literatura dotycząca wielopaliwowego spalania biomasy jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną, koncentrującą się na optymalizacji procesów energetycznych z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. Główne kierunki badawcze obejmują przede wszystkim ustalanie optymalnych proporcji mieszanek różnych rodzajów biomasy, co ma na celu maksymalizację efektywności energetycznej przy jednoczesnej minimalizacji problemów technicznych i środowiskowych (Saidur i in., 2011). Szczególną uwagę poświęca się właściwemu doborowi składników mieszanek w taki sposób, aby uśrednić niekorzystne cechy pojedynczych rodzajów biomasy – np. wysoką zawartość chloru lub metali alkalicznych – poprzez ich połączenie z surowcami bardziej stabilnymi chemicznie.

Znaczącym wsparciem dla rozwoju technologii wielopaliwowego spalania są również zaawansowane modele numeryczne i symulacyjne, które pozwalają na przewidywanie zachowania mieszanek biomasy w warunkach rzeczywistych procesów spalania. Dzięki modelom komputerowym można analizować scenariusze współspalania bez konieczności kosztownych badań eksperymentalnych na dużą skalę. Symulacje umożliwiają optymalizację zarówno składu mieszanek paliwowych, jak i parametrów pracy instalacji (Saidur i in., 2011).

Współspalanie różnych rodzajów biomasy roślinnej jawi się zatem jako zaawansowana i obiecująca technologia, pozwalająca na bardziej efektywne i zrównoważone wykorzystanie odnawialnych zasobów. Liczne badania potwierdzają, że strategia ta może przyczynić się do optymalizacji składu chemicznego paliwa, poprawy stabilności procesu spalania oraz ograniczenia emisji szkodliwych substancji (Werle i Wilk, 2010). Implementacja tej technologii w skali przemysłowej wymaga dalszych działań badawczo-rozwojowych. W szczególności należy rozwiązać problemy związane z korozją powierzchni grzewczych, osadzaniem się szlaki oraz złożonością logistyki wielopaliwowej. Ponadto konieczne jest ciągłe monitorowanie emisji i dostosowywanie parametrów technologicznych do zmieniających się właściwości mieszanek paliwowych.

Wielopaliwowe spalanie biomasy roślinnej stanowi jedną z najbardziej obiecujących strategii w kontekście transformacji energetycznej, której celem jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii. Zastępowanie paliw kopalnych biomasą – szczególnie w formie mieszanek różnych jej rodzajów – umożliwia nie tylko poprawę efektywności energetycznej procesów spalania, ale również znaczące ograniczenie emisji dwutlenku węgla, przy założeniu zrównoważonego cyklu życia biomasy.

Literatura naukowa jednoznacznie wskazuje, że łączenie biomasy roślinnej o odmiennych właściwościach fizykochemicznych pozwala na optymalizację składu mieszanek paliwowych, co przekłada się na stabilniejszy przebieg procesu spalania, zmniejszenie ryzyka występowania zgorzeli, korozji oraz osadów, a także na bardziej efektywne wykorzystanie dostępnych surowców. Strategia ta pozwala na zwiększenie elastyczności operacyjnej zakładów energetycznych, które dzięki dywersyfikacji źródeł biomasy są mniej narażone na sezonowe lub regionalne ograniczenia podaży.

Jednocześnie należy podkreślić, że wdrażanie technologii wielopaliwowego spalania biomasy wiąże się z licznymi wyzwaniem technicznymi i środowiskowymi. Kluczowe z nich to: różnorodność właściwości paliwowych poszczególnych rodzajów biomasy, problemy z mieszaniem i dozowaniem surowców, emisje tlenków azotu oraz związki powodujące korozję (zwłaszcza potas, sód i chlor). Pokonanie tych barier wymaga zastosowania zaawansowanych technologii pre-obróbki surowców, takich jak toryfikacja, oraz rozwoju nowoczesnych systemów zarządzania procesem spalania, opartych m.in. na modelowaniu komputerowym.

Na podstawie przeglądu literatury można stwierdzić, że wielopaliwowe spalanie biomasy jest technologią o wysokim potencjale wdrożeniowym, zarówno w małych instalacjach lokalnych, jak i w dużych jednostkach przemysłowych. Korzyści środowiskowe i operacyjne wynikające z mieszania różnych rodzajów biomasy przeważają nad ograniczeniami, pod warunkiem odpowiedniego doboru surowców i kontroli procesu. Dalsze badania powinny koncentrować się na ustaleniu optymalnych składów mieszanek biomasy energetycznych dla zastosowań energetycznych z uwzględnieniem aspektów optymalizacji procesu, ograniczenia emisji i zwiększeniu trwałości urządzeń. W dłuższej perspektywie, rozwój technologii współspalania biomasy z innymi odnawialnymi paliwami może stanowić kluczowy element zrównoważonego systemu energetycznego, wpisującego się w cele polityki klimatycznej Unii Europejskiej i globalne strategie dekarbonizacji.

Prowadzenie badań nad współspalaniem różnych rodzajów biomasy roślinnej ma kluczowe znaczenie dla dalszego rozwoju tej technologii. Prowadzi do zrozumienia interakcji zachodzących pomiędzy składnikami mieszanek paliwowych, ich wpływu na emisje zanieczyszczeń, efektywność spalania oraz zużycie instalacji energetycznych. Badania laboratoryjne i symulacje obiektowe umożliwiają identyfikację optymalnych proporcji i warunków eksploatacyjnych, co z kolei przekłada się na większą stabilność procesu, niższe koszty operacyjne i mniejsze ryzyko awarii.

Współspalanie różnych rodzajów biomasy roślinnej to stosunkowo nowa dziedzina badań, która dopiero zyskuje na znaczeniu w kontekście transformacji energetycznej i dekarbonizacji sektora energetycznego. Pomimo rosnącego zainteresowania tym zagadnieniem, literatura naukowa wciąż pozostaje ograniczona, a wiele aspektów – takich jak długoterminowy wpływ mieszanek biomasowych na trwałość instalacji, emisje specyficznych zanieczyszczeń czy logistyka surowcowa – wymaga dalszych, pogłębionych analiz. Brakuje także kompleksowych badań porównawczych dla różnych konfiguracji mieszanek oraz rzeczywistych warunków eksploatacyjnych w instalacjach przemysłowych. Z tego względu rozwój wiedzy w tym obszarze stanowi ważny kierunek zarówno dla nauki, jak i praktyki inżynierskiej.

## **1.2. Konwersja energetyczna biomasy**

Wykorzystanie biomasy roślinnej w sektorze energetycznym stanowi jeden z kluczowych kierunków rozwoju odnawialnych źródeł energii. Biomasa roślinna jako surowiec odnawialny i powszechnie dostępny, odgrywa istotną rolę w strategiach mających na celu ograniczenie emisji gazów cieplarnianych oraz osiągnięcie celów zrównoważonego rozwoju (Cherubini, 2010). Dzięki możliwości przetwarzania na różnorodne formy energii – takie jak energia cieplna, elektryczna czy paliwa biomasowe – biomasa stanowi wartościową alternatywę dla paliw kopalnych (McKendry, 2002a).

Ze względu na jej właściwości fizykochemiczne oraz formę surowca, biomasa roślinna jest klasyfikowana według przydatności do różnych technologii konwersji energetycznej. Spalanie stanowi najprostszy i najbardziej rozpowszechniony sposób wykorzystania biomasy, szczególnie w instalacjach o małej i średniej mocy (Saidur i in., 2011). W praktyce przemysłowej biomasa roślinna, występująca m.in. w postaci zrębków drzewnych, pozostałości po przetwórstwie rolno-spożywczym oraz przetworzonych paliw biomasowych takich jak pelety, jest wykorzystywana głównie do wytwarzania energii cieplnej (Mani i in., 2006). Energia ta może następnie być przekształcana w energię elektryczną lub służyć do celów grzewczych, co czyni spalanie biomasy efektywnym i powszechnie stosowanym rozwiązaniem w elektrociepłowniach oraz instalacjach przemysłowych o niewielkich i średnich mocach (Demirbas, 2007).

Biogazowanie biomasy to odmienny proces wykorzystania biomasy, w którym w wyniku fermentacji beztlenowej następuje produkcja biogazu, głównie metanu ( $\text{CH}_4$ ) (Weiland, 2010). W tym procesie wykorzystywana jest biomasa trudna do przerobu bądź nieopłacalna do zagospodarowania w procesach cieplnych, taka jak resztki roślinne, odpady rolnicze, obornik czy resztki spożywcze (Sánchez, 2009). Biogaz jest mieszaniną metanu i dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ), która może być używana jako paliwo do wytwarzania energii elektrycznej, ciepła lub jako biometan do zastosowań w transporcie (Chandra, i in., 2012). Biogazownie, które wykorzystują odpady roślinne do produkcji biogazu, stają się coraz bardziej popularne, zwłaszcza w regionach dysponujących dużymi ilościami odpadów rolniczych (Murphy i in., 2011). Produkcja biogazu oraz pozytywny wpływ na środowisko, gdyż zmniejsza emisję metanu – silnego gazu cieplarnianego – do atmosfery (IPCC, 2014).

Inną formą zagospodarowania biomasy roślinnej jest produkcja biopaliw. Biomasa przetwarzana na biopaliwa, takie jak bioetanol, biodiesel czy biometan, wykorzystywane jest w transporcie lub jako paliwa alternatywne w energetyce, co stanowi odpowiedź na rosnące wymagania energetyczne (Demirbas, 2009). Produkowany bioetanol jest wykorzystywany głównie jako dodatek do paliw kopalnych, co zmniejsza emisję gazów cieplarnianych i uzależnienie od ropy naftowej (Balat i Balat, 2009). Biodiesel powstaje z roślin oleistych, takich jak rzepak czy soja, i jest używany jako paliwo do silników wysokoprężnych (Knothe, 2010). Te biopaliwa, produkowane z roślin uprawnych, są bardziej przyjazne środowisku niż paliwa kopalne, ponieważ ich spalanie uwalnia dwutlenek węgla, który został wcześniej pochłonięty przez rośliny podczas wzrostu, zamykając tym samym cykl węglowy (Cherubini, 2010).

Wykorzystanie biomasy roślinnej w procesach termochemicznych, takich jak zgazowanie i piroliza, stanowi obiecującą alternatywę dla tradycyjnego spalania, oferując potencjalnie wyższą efektywność energetyczną oraz większą elastyczność w zastosowaniu końcowych produktów. Zgazowanie biomasy to proces, w którym pod wpływem wysokich temperatur (zazwyczaj  $700\text{--}1000^\circ\text{C}$ ) oraz przy ograniczonym dostępie tlenu lub pary wodnej, biomasa jest przekształcana w gaz syntezowy (syngas) – mieszaninę tlenku węgla ( $\text{CO}$ ), wodoru ( $\text{H}_2$ ) i dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) (Basu, 2010). Syngas może być następnie wykorzystany do produkcji energii elektrycznej w silnikach gazowych, turbinach lub do syntezy paliw ciekłych i chemikaliów (McKendry, 2002b; Zhang i in., 2014).

Zgazowanie cechuje się wyższą sprawnością konwersji energii w porównaniu do tradycyjnego spalania, a dodatkowo umożliwia lepsze wykorzystanie biomasy o różnorodnej jakości i wilgotności (Di Blasi, 2008).

Alternatywnym procesem termochemicznym jest piroliza biomasy, która zachodzi w warunkach beztlenowych w temperaturze 400–700°C. Piroliza prowadzi do powstania trzech głównych produktów: biowęgla (biochar), oleju pirolitycznego oraz gazu pirolitycznego (Bridgwater, 2012). Biowęgiel ma zastosowanie jako stałe paliwo oraz w rolnictwie, gdzie służy jako poprawiacz gleby, zwiększający retencję wody i dostępność składników odżywczych (Lehmann i Joseph, 2015). Olej pirolityczny może być stosowany jako paliwo lub surowiec do dalszej obróbki chemicznej, podczas gdy gaz pirolityczny może być wykorzystany do produkcji energii cieplnej (Mohan i in., 2006). Pomimo iż piroliza jest obecnie mniej rozpowszechniona niż spalanie czy zgazowanie, jej rosnąca popularność wynika z możliwości przetwarzania biomasy o niższej jakości oraz potencjału do produkcji wielofunkcyjnych produktów energetycznych i chemicznych (Bergman i in., 2005).

W kontekście spalania biomasy roślinnej, energia cieplna uwalniana w procesie jest wykorzystywana zarówno do ogrzewania budynków, jak i w kogeneracji, gdzie jednocześnie produkuje się ciepło i energię elektryczną, co znacznie zwiększa ogólną efektywność energetyczną (McKendry, 2002a; Cherubini, 2010). Wykorzystanie biomasy jako źródła energii jest nie tylko sposobem na zmniejszenie zależności od paliw kopalnych, lecz także ważnym elementem strategii przeciwdziałania zmianom klimatycznym, ze względu na potencjalnie neutralny bilans emisji dwutlenku węgla (IPCC, 2014).

Mimo licznych zalet, przetwarzanie biomasy w procesach termochemicznych wiąże się z wyzwaniem, takimi jak konieczność stosowania specjalistycznych technologii, wysokie koszty inwestycyjne oraz potrzeba odpowiedniego przygotowania surowca (wilgotność, rozdrobnienie) (Basu, 2010). Dynamiczny rozwój badań nad zgazowaniem i pirolizą biomasy oraz rosnące zainteresowanie tą tematyką w sektorze energetycznym, wskazują na duży potencjał tych technologii w przyszłości. Zaawansowane procesy termochemiczne, takie jak zgazowanie i piroliza, stanowią efektywne i perspektywiczne metody wykorzystania biomasy roślinnej. Pozwalają one na maksymalizację wykorzystania energii zawartej w surowcu oraz generowanie szerokiego wachlarza produktów energetycznych i chemicznych, co wpisuje się w globalne dążenia do zrównoważonego rozwoju i redukcji emisji gazów cieplarnianych.

### 1.3. Regulacje prawne dotyczące biomasy

Spalanie biomasy jest regulowane przez różne przepisy prawne, które mają na celu zapewnienie, że proces ten jest bezpieczny, efektywny i przyjazny dla środowiska. Z uwagi na potencjalny wpływ na zdrowie ludzi, jakość powietrza oraz ochronę środowiska, w wielu krajach wprowadzono szereg norm dotyczących emisji zanieczyszczeń, wymagań technicznych oraz zasad wykorzystywania biomasy. Omówienie regulacji dotyczących spalania biomasy energetycznej pozwala przedstawić wyzwania dla prowadzenia procesu w kontekście energetycznym, prawnym i technologicznym.

Dyrektywa Unii Europejskiej 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych ustanawia cele dla państw członkowskich UE w zakresie produkcji energii ze źródeł odnawialnych, w tym biomasy. Zachęca do wykorzystywania odnawialnych źródeł energii, w tym biomasy, w produkcji energii elektrycznej, ciepła oraz biopaliw. Określa zasady obliczania emisji gazów cieplarnianych związanych z produkcją energii z biomasy oraz wprowadza zasady dotyczące zrównoważonego pozyskiwania biomasy. Emisje CO<sub>2</sub> z biomasy są traktowane jako neutralne węglowo, ale inne zanieczyszczenia, takie jak pyły czy tlenki azotu, muszą być kontrolowane. Dyrektywa ta nakłada obowiązek oceny wpływu na środowisko w przypadku większych instalacji spalania biomasy.

Dyrektywa UE 2010/75/UE w sprawie emisji przemysłowych (IED - Industrial Emissions Directive) ma na celu ograniczenie emisji zanieczyszczeń powietrza w wyniku działalności przemysłowej, w tym także ze spalania biomasy w dużych jednostkach energetycznych. Określa dopuszczalne limity emisji zanieczyszczeń, takich jak pyły, tlenki azotu (NO<sub>x</sub>), tlenki siarki (SO<sub>2</sub>) i inne substancje szkodliwe dla zdrowia, w przypadku spalania biomasy w instalacjach o dużej mocy. Dyrektywa nakłada obowiązek stosowania najlepszych dostępnych technologii (BAT - Best Available Techniques), które pozwalają na minimalizowanie emisji zanieczyszczeń.

Polska Ustawa o Ochronie Powietrza reguluje kwestie związane z poprawą jakości powietrza w Polsce, w tym w kontekście emisji zanieczyszczeń ze spalania paliw również biomasowych. Określa wymagania dotyczące norm emisji spalin oraz reguluje normy emisji pyłów, tlenków azotu, tlenków siarki i innych substancji z procesów spalania biomasy. Wprowadza również system monitorowania jakości powietrza i raportowania o emisjach.

Ustawa o Odnawialnych Źródłach Energii (OZE) określa rozwój i wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, w tym biomasy, w Polsce. Definiuje zasady wspierania inwestycji w odnawialne źródła energii, w tym instalacje wykorzystujące biomasę do produkcji energii elektrycznej i ciepła.

Jednym z narzędzi wspierających jest system zielonych certyfikatów, wymagania dotyczące efektywności energetycznej oraz normy środowiskowe związane z emisją zanieczyszczeń.

W Europie oraz na całym świecie wprowadzane są systemy certyfikacji zrównoważonej produkcji biomasy, które mają na celu zapewnienie, że biomasa wykorzystywana do spalania pochodzi z odpowiedzialnych źródeł, które nie powodują degradacji środowiska ani nie zagrażają bioróżnorodności. Przykłady to certyfikaty, takie jak PEFC (Program for the Endorsement of Forest Certification) oraz FSC (Forest Stewardship Council), które zapewniają, że drewno i inne surowce roślinne wykorzystywane do produkcji biomasy pochodzą z lasów zarządzanych w sposób zrównoważony. Rozporządzenia krajowe dotyczące jakości paliw stałych, w tym biomasy, ustanawiają wymagania dotyczące jakości paliw używanych do spalania w kotłach i piecach. Obejmuje to takie aspekty jak zawartość wilgoci, popiołu, siarki i innych substancji, które mogą wpływać na jakość powietrza. Przepisy te regulują dopuszczalne limity zawartości wody i popiołu w biomasie, aby zapobiec nadmiernemu wytwarzaniu spalin i zanieczyszczeń podczas spalania biomasy.

Polityka energetyczna Polski do 2050 roku ma na celu transformację sektora energetycznego w kierunku zrównoważonego rozwoju, niskoemisyjności oraz zwiększenia efektywności energetycznej. Polska jako członek Unii Europejskiej, musi dostosować swoją politykę do ambitnych celów klimatycznych UE, a także zapewnić bezpieczeństwo energetyczne w kontekście zmieniającego się rynku energii.

Kluczowe cele i założenia Polityki Energetycznej Polski do 2050 roku to dekarbonizacja i neutralność klimatyczna.

Polska, podobnie jak inne państwa członkowskie Unii Europejskiej, zobowiązała się do osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 roku, czyli zrównoważenia emisji gazów cieplarnianych poprzez ich ograniczenie i równoczesne zwiększenie zdolności pochłaniania węgla (np. przez lasy). Redukcja emisji gazów cieplarnianych zakładana jest szczególnie w sektorze energetycznym, który jest jednym z głównych źródeł tych emisji. Polska ma zobowiązanie do stopniowego wycofywania węgla z miksu energetycznego i przechodzenia

na źródła energii odnawialnej. Planowane jest wygaszanie lub modernizacja przestarzałych elektrowni węglowych, a ich udział w krajowej produkcji energii ma maleć do minimum. Polska stawia na rozwiązania takie jak wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla (CCS) oraz wykorzystanie węgla w bardziej ekologiczny sposób, ale także stopniowo przechodzi na inne źródła.

Szansą osiągnięcia zakładanego celu jest zwiększenie udziału OZE poprzez rozwój energetyki wiatrowej, zarówno lądowej, jak i morskiej (*offshore*). Do 2050 roku energia wiatrowa ma stać się jednym z głównych źródeł energii w Polsce. Ważnym sektorem jest fotowoltaika (PV), której udział również ma rosnąć, zwłaszcza w kontekście rozwoju rozproszonych źródeł energii takich jak indywidualne instalacje PV na budynkach i niewielkie farmy fotowoltaiczne.

Istotną rolę odgrywa obecnie i będzie odgrywała w przyszłości biomasa i biogaz. Polska planuje zwiększenie produkcji energii z biomasy oraz biogazu, co może przyczynić się do zróżnicowania miksu energetycznego i wspierać przemiany w rolnictwie i przemyśle rolno – spożywczym.

Patrząc całościowo na system energetyczny należy brać pod uwagę szereg zależności, możliwości i szans do rozwoju lokalnej energetyki rozproszonej opartej o konsumowanie energii w miejscu produkcji i przekazywanie nadwyżek do lokalnych sieci energetycznych i ciepłowniczych. Konieczna jest przy tym transformacja sektora energetycznego i modernizacja infrastruktury. Inteligentne sieci energetyczne (*smart grids*) pozwolą na efektywniejsze zarządzanie energią w systemie elektroenergetycznym, integrację OZE oraz zarządzanie popytem i podażą energii w strukturach lokalnych i globalnych. Wzrost znaczenia technologii magazynowania energii, które umożliwią lepsze wykorzystanie niestabilnych źródeł energii odnawialnej, takich jak wiatr czy słońce pozwolą na stabilizację pracy sieci elektroenergetycznej oraz swobodę produkcji i konsumpcji.

Transformacja energetyczna to nie tylko źródła wytwórcze, ale i transport oraz rozwój infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych oraz strefy niskoemisyjne w miastach. Elektryfikacja transportu przyczynia się do redukcji emisji w sektorze transportu, który obecnie stanowi dużą część emisji gazów cieplarnianych. Rozwój technologii wodorowych, które mogą stać się ważnym elementem przyszłego miksu energetycznego, łączącego nadwyżki energii elektrycznej z technologiami wykorzystywanymi w transporcie i przemyśle.

Przechodzenie na OZE stanowi wyzwanie gospodarczo – przemysłowe. Pojęcie sprawiedliwej i zrównoważonej transformacji powinno przejawiać się w polityce krajowej uwzględniającej aspekty społeczne i ekonomiczne w transformacji energetycznej. Istnieje potrzeba wspierania regionów węglowych, które będą dotknięte zmianami, poprzez programy wsparcia, inwestycje w nowe technologie i tworzenie nowych miejsc pracy w sektorze OZE. Budowanie niskoemisyjnego potencjału energetycznego, modernizacja infrastruktury energetycznej oraz integracji nowych technologii, takich jak magazynowanie energii i wodór będzie stanowiło kluczowy element inwestycji w innowacje oraz przyszłościowe technologie na najbliższe lata dążąc do osiągnięcia neutralności węglowej do 2050 roku.

#### 1.4. Uwarunkowania środowiskowe jednostek energetycznych biomasowych

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 1 marca 2018 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko, to instalacje o mocy termicznej <10MW nie zaliczają się nawet do mogących potencjalnie znacząco oddziaływać na środowisko (§3.1 ppkt.4.). W myśl wspomnianego aktu prawnego, dla instalacji opalanych biomasą wymagane jest, aby – przy referencyjnej zawartości tlenu (O<sub>2</sub>) w spalinach wynoszącej 6% – stężenia emitowanych zanieczyszczeń nie przekraczały określonych wartości granicznych, w tym m.in. dla: tlenków azotu (NO<sub>x</sub>), tlenku węgla (CO), pyłu całkowitego (PM) oraz związków organicznych (LZO), jeżeli mają zastosowanie.

Spełnienie tych norm stanowi potwierdzenie, że instalacja funkcjonuje zgodnie z obowiązującymi wymaganiami prawnymi w zakresie ochrony środowiska i nie generuje ponadnormatywnego oddziaływania na jakość powietrza atmosferycznego.

**Tabela 1.** Standardy emisyjne dla jednostek biomasowych.

Lp.	Substancja zanieczyszczająca	Standard emisji*	
		jednostka	wartość
1	dwutlenek siarki	mg/m <sup>3</sup> <sub>u</sub>	200
2	tlenki azotu	mg/m <sup>3</sup> <sub>u</sub>	400
3	pył	mg/m <sup>3</sup> <sub>u</sub>	50

Źródło: Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 marca 2018 r.

Maksymalne ładunki zanieczyszczeń emitowany do atmosfery z kotła opalanego biomasą z którego emisje zanieczyszczeń do powietrza atmosferycznego odbywają się w sposób zorganizowany poprzez komin o wysokości  $H = 20$  m oraz średnicy  $DN = 700$  mm przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Maksymalny ładunek zanieczyszczeń z kotłowni biomasowej.

Lp.	Substancja zanieczyszczająca	Standard emisji*		Ładunki zanieczyszczeń Emitter E-P1			
		jedn.	wartość	jedn.	wartość	jedn.	wartość
1	Dwutlenek siarki	mg/m <sup>3</sup> <sub>u</sub>	200	kg/h	1,6186	Mg/rok	5,0063
2	Tlenki azotu	mg/m <sup>3</sup> <sub>u</sub>	400	kg/h	3,2372	Mg/rok	10,0127
3	Pył	mg/m <sup>3</sup> <sub>u</sub>	50	kg/h	0,40465	Mg/rok	1,2516

Źródło: Opracowanie własne na podstawie dokumentacji DTR Kotłowni Biomasowej.

\*Wg rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 1 marca 2018 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, (załącznik nr 5 - źródła o nominalnej mocy cieplnej < 5 MW spalające biomasę lub pozostałe paliwa stałe).

Wartości odniesienia dwutlenku siarki i dwutlenku azotu w powietrzu są dotrzymane i nie stanowią zagrożenia dla stanu jakości powietrza. Z uwagi na wysoki poziom stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> w określonym tle zanieczyszczeń dla powietrza w mieście Żyrardów, które wynosi:  $R=26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (obowiązujący poziom:  $Da=20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), to instalacja oczyszczania spalin kotła na biomasę wyposażona została w wysokosprawny dwustopniowy system odpylania pyłów w spalinach. Składa się on z multicyklona i elektrofiltra, gwarantuje osiągnięcie poziomów emisji ( $<50\text{mg}/\text{Nm}^3$  spalin 6% O<sub>2</sub>).

System KZR INiG jako narzędzie weryfikacji zgodności paliw biomasowych z kryteriami zrównoważonego rozwoju. Weryfikację spełniania przez certyfikowane paliwa kryteriów zrównoważonego rozwoju umożliwia Krajowy System Zrównoważonego Rozwoju – Instytut Nafty i Gazu (KZR INiG). Jest to globalny system certyfikacji, opracowany z myślą o jednostkach certyfikujących, działających w ramach programów akredytacyjnych nadzorowanych przez Polskie Centrum Akredytacji (PCA). System ten wdraża wymagania określone w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 (RED II) w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, obowiązującej w latach 2021–2030.

RED II wprowadza kompleksowe przepisy dotyczące m.in. certyfikacji biopaliw, wymogów środowiskowych w zakresie produkcji surowców oraz ograniczenia emisji gazów cieplarnianych (GHG). Zgodnie z zapisami dyrektywy, paliwa z biomasy mogą być kwalifikowane jako odnawialne tylko wówczas, gdy spełniają określone kryteria zrównoważonego rozwoju oraz wymogi dotyczące redukcji emisji GHG, szczególnie w kontekście ich wykorzystania w instalacjach produkujących energię elektryczną, ciepło lub chłód, a także w instalacjach o całkowitej nominalnej mocy cieplnej  $\geq 20$  MW (w przypadku stałych paliw z biomasy).

Warto zaznaczyć, że z dniem 20 listopada 2023 r. weszła w życie nowa Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/2413 (RED III), modyfikująca postanowienia RED II. Dyrektywa RED III utrzymuje klasyfikację biomasy drzewnej jako odnawialnego źródła energii (OZE) oraz nadal uznaje spalanie drewna jako kwalifikujące się do celów OZE. Jednocześnie zaostrza wymagania dotyczące zrównoważonego wykorzystania biomasy – obecnie obowiązek spełniania kryteriów zrównoważonego rozwoju oraz ograniczenia emisji gazów cieplarnianych dotyczy również instalacji o całkowitej nominalnej mocy cieplnej  $\geq 7,5$  MW.

Elektrociepłownia biomasowa zlokalizowana na terenie zakładu Polmos Żyrardów Sp. z o.o. wykorzystuje jako paliwo przede wszystkim zrębkę drzewną pochodzącą z drewna niepełnowartościowego. Surowiec ten pozyskiwany jest m.in. w wyniku uprzętań powierzchni nieleśnych lub z wycinek obejmujących drewno niespełniające standardów surowca pełnowartościowego. Każdorazowo dostawy surowca potwierdzane są opiniami brakarskimi, potwierdzającymi brak przydatności drewna do innych zastosowań przemysłowych.

Drewno niepełnowartościowe stosowane w procesie spalania dzieli się na:

- drewno średniowymiarowe (S4) – charakteryzujące się tolerancją większości wad drewna, takich jak: zwęglenia, obecność szkodników, zgnilizna miękka czy deformacje (krzywizna).
- drewno małowymiarowe (M) – obejmujące sortymenty o średnicy dolnej w korze do 7 cm, zarówno z gatunków liściastych, jak i iglastych.

W elektrociepłowni spalana jest również zrębka agro pochodząca z plantacji roślin energetycznych oraz odpady tartaczne, takie jak: zrębka tartaczna, kora, będące produktami ubocznymi przemysłu drzewnego i stanowiące frakcję odpadową po obróbce mechanicznej drewna.

Kolejnym alternatywnym paliwem wykorzystywanym w instalacji są rdzenie kolb kukurydzy – odpady rolnicze, cechujące się relatywnie wysoką wartością opałową, niskimi kosztami transportu oraz łatwą dostępnością. Surowiec ten może być efektywnie spalany w odpowiednio dobranych proporcjach z biomasą drzewną.

Dodatkowo, Destylarnia Belvedere, będąca częścią zakładu, podejmuje działania w kierunku wykorzystania surowców pochodzących bezpośrednio z terenu zakładu, takich jak liście i skoszona trawa, które są dodawane do mieszanki rdzeni kolb kukurydzy oraz biomasy drzewnej, zwiększając lokalny poziom odzysku energii z odpadów organicznych.

Instalacja posiada również możliwość współspalania płynnych produktów ubocznych oraz odpadów powstających w procesie destylacji alkoholu, z czego szczególne znaczenie ma wywar pogorzelniczny. Jest to odpad trudny w zagospodarowaniu z uwagi na swoją objętość, skład chemiczny i wysoką zawartość wilgoci, dlatego jego wykorzystanie jako paliwa w biokotłowni stanowi efektywną i proekologiczną metodę ograniczenia problemów związanych z jego magazynowaniem i utylizacją.

W celu ograniczenia emisji zanieczyszczeń powstających w procesie spalania, Elektrociepłownia Polmos Żyrardów Sp. z o.o. została wyposażona w elektrofiltr, czyli urządzenie do elektrostatycznego oczyszczania gazów odlotowych. Układ ten istotnie redukuje emisję cząstek stałych oraz przyczynia się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i substancji szkodliwych dla środowiska.

Przy referencyjnej zawartości tlenu w spalinach wynoszącej 6% O<sub>2</sub>, system spalania biomasy w elektrociepłowni osiąga następujące parametry emisyjne:

- pył całkowity (za multicyklonem): < 225 mg/Nm<sup>3</sup>,
- pył całkowity (za elektrofiltrem): < 20 mg/Nm<sup>3</sup>,
- dwutlenek siarki (SO<sub>2</sub>): < 200 mg/Nm<sup>3</sup>,
- tlenki azotu (NO<sub>x</sub>): < 300 mg/Nm<sup>3</sup>.
- 

Wskazane wartości świadczą o zastosowaniu skutecznych technologii oczyszczania spalin i zgodności instalacji z obowiązującymi normami ochrony środowiska, co czyni ją przykładem zrównoważonego wykorzystania biomasy w energetyce przemysłowej.

Procesy produkcji energii elektrycznej i ciepłej w kotłowni Destylarni Belvedere powodują powstawanie odpadów, przede wszystkim popiołów lotnych. Podstawowym kryterium jest możliwość klasyfikowania popiołu lotnego jako produktu ubocznego

Zagospodarowanie popiołów ze spalania biomasy w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym jest jednym z najbardziej efektywnych i środowiskowo korzystnych sposobów zagospodarowania popiołów powstających w wyniku spalania biomasy roślinnej jest ich wtórne wykorzystanie jako składnika nawozowego, z przeznaczeniem do aplikacji w glebie. Rozwiązanie to jest w pełni zgodne z koncepcją gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), której celem jest maksymalne ograniczenie wytwarzania odpadów i pełne zagospodarowanie zasobów w ramach zamkniętego cyklu materiałowego.

Popiół z biomasy, w szczególności roślinnej, stanowi bogate źródło makro- i mikroelementów niezbędnych dla wzrostu i rozwoju roślin uprawnych. W jego składzie dominują takie składniki pokarmowe, jak: fosfor (P), potas (K), wapń (Ca), siarka (S), magnez (Mg).

Z uwagi na swój skład chemiczny, popiół ten może być skutecznie stosowany jako naturalny środek poprawiający właściwości gleby oraz uzupełniający niedobory składników pokarmowych w uprawach takich jak: pszenica jara, kukurydza, ziemniaki czy rośliny strączkowe.

Zastosowanie popiołu w rolnictwie wspiera realizację zasad zrównoważonego rozwoju, przyczyniając się do:

- poprawy żyzności gleb,
- zmniejszenia zapotrzebowania na nawozy mineralne,
- zwiększenia produktywności rolniczej,
- ograniczenia ilości odpadów kierowanych na składowiska.

Alternatywnym kierunkiem zagospodarowania popiołów powstających w procesie spalania biomasy jest ich wykorzystanie w przemyśle materiałów budowlanych, gdzie mogą pełnić funkcję surowca uzupełniającego lub zastępczego w produkcji m.in. cementu, betonu, ceramiki budowlanej oraz kruszyw lekkich.

W szczególności, popioły lotne pochodzenia biomasowego znajdują zastosowanie jako materiały pucolanowe. Pucolany to substancje mineralne o charakterze krzemionkowym lub krzemionkowo-glinowym, które w obecności wilgoci reagują z wodorotlenkiem wapnia ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), tworząc produkty o właściwościach wiążących – głównie krzemiany wapnia i gliniany wapnia. Reakcje te prowadzą do podwyższenia trwałości i wytrzymałości materiałów cementowych oraz poprawy ich odporności chemicznej.

Popioły pochodzące ze spalania biomasy zawierają w swoim składzie znaczące ilości: krzemionki ( $\text{SiO}_2$ ), tlenku glinu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), tlenku żelaza ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) oraz innych minerałów o właściwościach pucolanowych, które predysponują je do wykorzystania jako potencjalny substytut popiołów lotnych (powstających ze spalania węgla kamiennego) w produkcji betonu i spoiw hydraulicznych.

Zastosowanie popiołu biomasowego w sektorze budowlanym nie tylko wpisuje się w założenia gospodarki cyrkularnej, ale również pozwala na redukcję zużycia zasobów naturalnych i zmniejszenie emisji  $\text{CO}_2$ , m.in. poprzez częściowe zastąpienie klinkieru cementowego.

Wymaga się jednak, aby właściwości fizykochemiczne popiołów biomasowych zostały każdorazowo potwierdzone odpowiednimi badaniami, w celu spełnienia wymagań norm technicznych (np. PN-EN 450 dla popiołów lotnych stosowanych w betonie) oraz zapewnienia bezpieczeństwa użytkowego finalnych wyrobów budowlanych (Olatoyan, i in., 2023).

Zastosowanie popiołu z biomasy może znacząco przyczynić się do redukcji emisji gazów cieplarnianych z produkcji cementu. Takie włączenie mogłoby przyczynić się do zmniejszenia zużycia energii i surowców przez przemysł cementowy, a także ograniczyć bezpośrednie składowanie pozostałości po spalaniu biomasy (Tosti, i in., 2019).

Kolejną formą zagospodarowania popiołu jest wykorzystanie go do oczyszczania ścieków przemysłowych i osadów ściekowych. Materiał odpadowy w postaci popiołów lotnych ze spalania biomasy może być tańszą alternatywą dla stosowania  $\text{CaO}$  w procesie stabilizacji chemicznej osadów ściekowych (Poluszyńska, 2013). Popioły ze względu na swoje właściwości alkaliczne mogą spełniać rolę substancji higienizującej osad ściekowy (pH wyciągów wodnych ok. 13, wysoka zawartość  $\text{CaO}$  reaktywnego) (Poluszyńska, 2013). Dodatkowo właściwości pucolanowe popiołów lotnych mogą korzystnie wpłynąć na immobilizację metali zawartych w osadach ściekowych w formy nierozpuszczalne w wodzie, a co za tym idzie nieprzyswajalne przez rośliny (Poluszyńska, 2013). Dodatek popiołu z biomasy drzewnej poprawia odwadnianie osadów oraz zmniejsza ogólną liczbę bakterii (Wójcik, i in., 2020). Ciekawym rozwiązaniem jest również zastosowanie mieszaniny składającej się z osadów ściekowych i popiołu z biomasy drzewnej. Taka mieszanka może okazać się przydatna w rolnictwie, do wapnowania i nawożenia, ze względu na swoje właściwości neutralizujące i koncentrację fitoskładników.

Zakład Polmos Żyrardów Sp. z o.o. jest samowystarczalny energetycznie. „Samowystarczalność energetyczna na szczeblu lokalnym oznacza zapewnienie lokalnego bezpieczeństwa energetycznego”. Wykorzystanie zasobów odnawialnych źródeł energii daje możliwość zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego. „Aby zaspokoić zapotrzebowanie na usługi energetyczne w obszarze samowystarczalnym energetycznie powinny być również wyselekcjonowane paliwa dostarczane do użytkownika końcowego, w zależności od dostępnej na danym obszarze infrastruktury. W pierwszej kolejności powinny być preferowane nośniki energii najmniej oddziałujące na środowisko (Popławski, 2019). Do takich nośników można zaliczyć m.in. biomasę pochodzenia leśnego, rolniczego, odpadowego, a także farmę fotowoltaiczną.

Opracowana i wdrożona w Destylarni Belvedere zintegrowana instalacja oparta na źródłach odnawialnych — biomasie oraz energii słonecznej — umożliwia efektywne wykorzystanie dostępnych surowców energetycznych oraz produkcję zielonej energii elektrycznej i ciepłej na skalę lokalną.

System składa się z elektrociepłowni biomasowej oraz farmy fotowoltaicznej, które wspólnie zapewniają pokrycie potrzeb technologicznych i grzewczych zakładu. W sytuacji wystąpienia nadwyżek wytworzonej energii elektrycznej, nadmiar jest przekazywany do lokalnej sieci energetycznej, co umożliwia bilansowanie zapotrzebowania i zwiększa efektywność energetyczną zakładu.

Farma fotowoltaiczna pracuje przez cały rok, natomiast elektrociepłownia biomasowa jest eksploatowana głównie w okresie zimowym kiedy prowadzony jest proces rektyfikacji. W sezonie letnim, głównym źródłem energii elektrycznej jest farma fotowoltaiczna. W przypadku niedoborów energii elektrycznej, zakład ma możliwość zakupu energii z lokalnej sieci dystrybucyjnej.

Destylarnia posiada certyfikat ISO 50001, potwierdzający wdrożenie systemu zarządzania energią, mającego na celu ograniczenie śladu środowiskowego poprzez efektywne gospodarowanie energią i optymalizację jej wykorzystania.

Ponadto, elektrociepłownia jest wyposażona w systemy odzysku ciepła, co pozwala na bardziej efektywne wykorzystanie energii ciepłej na potrzeby wewnętrzne zakładu. Budynek technologiczny, w którym zlokalizowana jest instalacja, posiada certyfikat energooszczędności, potwierdzający zastosowanie rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych minimalizujących straty energetyczne.

## 1.5. Produkty spalania biomasy możliwe do zagospodarowania w rolnictwie

Spalanie biomasy roślinnej w instalacjach energetycznych małych mocy prowadzi do wytwarzania energii cieplnej oraz energii elektrycznej w procesach kogeneracyjnych. Zagospodarowanie produktów ubocznych w przemyśle rolno – spożywczego na cele energetyczne stanowi szansę dla rozwoju samego przemysłu i zwiększenie jego konkurencyjności w kontekście biznesowym. Dodatkowe wzmocnienie tego procesu można osiągnąć poprzez zagospodarowanie produktów ubocznych procesu spalania biomasy energetycznej pochodzenia roślinnego na cele nawozowe jak i poprawę jakości gleby. W wyniku spalania biomasy powstają różne produkty, które mogą mieć zastosowanie w rolnictwie lub budownictwie.

Problem zagospodarowania stałych odpadów ze spalania biomasy różnego pochodzenia (zwanych niekiedy fitopopiołami) w naszym kraju nabiera coraz większego znaczenia. Powstaje bowiem zarówno w przemyśle (nie tylko w energetyce) jak i w sektorze komunalnym coraz to więcej instalacji wykorzystujących biomasę różnego pochodzenia jako paliwo. I choć w porównaniu ze spalaniem węgla popiołów powstaje w nich niewiele to ich dynamicznie rosnąca liczba powoduje znaczące zwiększenie się wolumenu tych odpadów. W Szwecji instalacje biomasowe, gdzie spala się biomasę pochodzenia leśnego i pozyskaną z dedykowanych upraw szybko rosnących roślin energetycznych, uruchamiano licznie w latach 90-tych XX wieku i działają one od tej pory nieprzerwanie, a popioły wykorzystywane są do nawożenia upraw leśnych jako nawozy wapniowo-potasowe. W naszym kraju, gdzie bardzo często stosuje się współspalanie biomasy z węglem charakterystyka stałych odpadów ze spalania nie pozwala na tak proste rozwiązania i jeszcze dochodzi spory opór potencjalnych użytkowników (leśników, rolników) przed wykorzystaniem produktów odpadowych. Dlatego tak istotne dla gospodarki obiegu zamkniętego i sektora nawozowego może być wykorzystanie czystych fitopopiołów tj. pochodzących ze spalania wyłącznie paliwa biomasowego pochodzenia roślinnego.

Prowadzenie procesu spalania biomasy w specjalnych warunkach prowadzi do powstawania biowęgla (biochar). Jest to forma węgla uzyskiwana w wyniku pirolizy biomasy roślinnej w warunkach beztlenowych. Jest to produkt uboczny procesu wytwarzania energii z biomasy, ale może być również powstający podczas spalania w odpowiednich warunkach np. niskotemperaturowych.

Biowęgiel ma dużą powierzchnię i zdolność do absorpcji wody oraz składników odżywczych przez co może być stosowany w rolnictwie jako dodatek do gleby. Poprawia strukturę gleby, zwiększa jej zdolność do zatrzymywania wody oraz składników pokarmowych, a także wspomaga aktywność mikroorganizmów glebowych. Dodatkowo, biowęgiel może zwiększać odporność roślin na stresy abiotyczne (np. suszę) i przyczyniać się do zwiększenia plonów.

Należy pamiętać, że podczas spalania biomasy powstają emisje i gazy cieplarniane. Procesy spalania biomasy prowadzone w piecach starszego typu i w niekontrolowanych warunkach może prowadzić do uwolnienia różnych gazów cieplarnianych, takich jak dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ), metan ( $\text{CH}_4$ ) oraz tlenki azotu ( $\text{NO}_x$ ). Choć biomasa jest uznawana za neutralną węglowo (w sensie równoważenia emisji  $\text{CO}_2$  w procesie wzrostu i spalania), niekontrolowane emisje mogą mieć negatywny wpływ na środowisko. Jeśli proces spalania jest kontrolowany i wykorzystuje nowoczesne technologie, emisje mogą zostać zredukowane, a uwalniane gazy mogą być używane do produkcji biogazu lub energii elektrycznej. Z kolei emisje gazów cieplarnianych mogą być minimalizowane przez stosowanie systemów oczyszczania spalin, co ma kluczowe znaczenie dla zrównoważonego rozwoju rolnictwa.

Produkty uboczne spalania, takie jak popiół, czy biowęgiel mogą być stosowane w rolnictwie jako nawozy. Mogą one poprawić strukturę gleby, zwiększając jej zdolność do zatrzymywania wody i składników odżywczych, co pozytywnie wpływa na plony.

Produkty spalania biomasy mogą być stosowane w postaci dodatków do kompostu. Odpady roślinne, takie jak liście, resztki roślinne po zbiorach czy z procesów rolno – produkcyjnych, mogą być kompostowane i w ten sposób przekształcane w wartościowy nawóz organiczny, który poprawia jakość gleby. Kompostowanie to naturalny sposób przetwarzania biomasy roślinnej, który wspiera zrównoważoną produkcję rolną, zmniejszając potrzebę stosowania sztucznych nawozów chemicznych. W ten sposób biomasa roślinna przyczynia się do wzrostu efektywności rolnictwa, jednocześnie zmniejszając negatywny wpływ na środowisko. Spalanie biomasy roślinnej w rolnictwie generuje różne produkty, które mogą być wykorzystywane do poprawy jakości gleby.

Regulacje prawne i kryteria stosowania popiołów biomasowych zarówno przyrodniczego (w rolnictwie i leśnictwie) jak i przemysłowego (głównie w produkcji materiałów budowlanych) nie są jednakowe we wszystkich krajach i regionach świata (nawet w samej Unii Europejskiej). Silva i in. (2019) w swojej pracy przeglądowej na temat

konfrontacji możliwości rolniczego wykorzystania popiołów ze spalania biomasy i regulacji prawnych obowiązujących w różnych krajach UE uważają, że te sprzeczności muszą być jak najszybciej wyeliminowane przez prawodawstwo wspólnotowe. Przepisy te wprowadzone np. przez kraje skandynawskie, a także przez Austrię z racji długoletniego już doświadczenia w powszechnym energetycznym wykorzystaniu biomasy w tych krajach mogą być podstawą dla prawodawstwa światowego w tym względzie (Emilsson, 2006).

Niestety jak na to wskazują da Costa i in. (2020) składowanie fitopopiołów jako jedyna metoda ich zagospodarowania w wielu regionach świata jest nadal powszechną praktyką, a poza tym, że wyklucza nawozowe ich wykorzystania to ponadto składowanie jest źródłem kosztów, a nie potencjalnych zysków. Jednym z głównych powodów, dla których te produkty odpadowe mogą znaleźć efektywne przyrodniczo i ekonomicznie zastosowania jest ich zdolność do odkwaszania gleby, bo jak wiadomo większość roślin uprawnych rośnie i plonuje lepiej w warunkach lekko kwaśnego lub obojętnego odczynu gleb, co w konwencjonalnym rolnictwie zapewnia się wapnowaniem, co wiąże się z wykorzystywaniem nieodnawialnych złóż osadowych skał wapniowych co dodatkowo obciąża produkcję żywności.

Według obowiązującego w Polsce rozporządzenia Parlamentu Europejskiego odpady paleniskowe uważane są za odpady stałe wymagające odpowiedniego zagospodarowania. To zagospodarowanie jest problemem nie do końca rozwiązany, ponieważ wiele popiołów składowanych jest niestety na składowiskach, co prowadzi do zanieczyszczenia wszystkich elementów środowiska. W dobie konieczności jak najszybszego wprowadzania do praktyki idei gospodarki cyrkularnej takie rozwiązanie jak składowanie nie powinno być w ogóle brane pod uwagę. Wśród dwóch podstawowych kierunków to właśnie przyrodnicze zastosowanie popiołów jest jak się wydaje najbardziej zbliżone do realizacji postulatów gospodarki obiegu zamkniętego.

Tosti i in. (2019) uważają, że choć wiele już wiadomo na temat korzystnego oddziaływania popiołów biomasowych na właściwości gleby i ponadto znane są możliwości ich zastosowania w przemyśle cementowym to i tak w wielu rejonach świata duża część popiołów podlega nadal składowaniu ze względu zarówno na obowiązujące regulacje prawne jak i poważne obawy co do przedostawania się do łańcucha pokarmowego pierwiastków śladowych. Dlatego wyjątkowo istotne jest oszacowanie zarówno zagrożenia środowiskowego jak i korzyści dla społeczeństwa i środowiska naturalnego związanych z szerokim wykorzystaniem nieuchronnie powstających stałych produktów spalania.

Wydaje się, że osiągnięcie zrównoważonej środowiskowo produkcji energii nie będzie możliwe jeśli nie zostanie opracowany system bezpiecznego i korzystnego ekonomicznie wykorzystania stałych odpadów ze spalania biomasy. Popioły biomasowe składają się ze złożonej mieszaniny związków organicznej jak i mineralnych, o wieloskładnikowym i zmiennym składzie. Struktura frakcji nieorganicznej w popiele biomasowym obejmuje składniki półkrystaliczne, krystaliczne i amorficzne. Materia związków węgla obejmuje minerały organiczne, frakcje uwęgloną a także materię płynną, w tym wodę, wtrącenia gazowe i ciekłe związane zarówno z materią nieorganiczną, jak i organiczną. Popiół można traktować na źródło dostępnych metali, występujących w różnych formach chemicznych a wśród nich najpowszechniej spotyka się w popiołach:  $Al_2O_3$ , CaO, MgO, Ni, Pb,  $K_2O$ , Zn, Sr (Munawar i in. 2021).

Wiadomo już od czasów gospodarki żarowej, że odpady paleniskowe zawierają składniki pokarmowe dla roślin i dlatego z korzyścią mogą być wykorzystywane w rolnictwie. Z tego powodu nadzwyczaj zasadne jest postawione przez Diatte i Kowalskiego (2017) pytanie czy nie byłoby to pożądane i rozsądne rozwiązanie, aby popioły ze spalania biomasy (nazywane przez Autorów fitopopiołami) nie były traktowane jako odpady, ale raczej jako produkty uboczne co miałyby wielkie znaczenie w efektywnym wykorzystaniu tych popiołów. Autorzy ci postulują przeprowadzenie w naszym kraju wielokierunkowych i multidyscyplinarnych badań nad fitopopiołami.

Biomasa, podobnie jak powstałe z niej w procesach geologicznych powszechnie obecnie wykorzystywane w energetyce paliwa nieodnawialne, jest chemicznie rzecz biorąc heterogenną mieszaniną materii organicznej o skomplikowanej i różnorodnej strukturze i w mniejszej niż w przypadku paliw nieodnawialnych zawartości składników mineralnych. W odróżnieniu od paliw nieodnawialnych biomasa zawiera także fazę ciekłą, co istotnie wpływa zarówno na przebieg samego procesu spalania jak i na właściwości stałych produktów spalania.

Ponieważ najczęściej obecnie stosowaną technologią w energetycznym wykorzystaniu biomasy jest spalanie rusztowe to w konsekwencji tego w największych ilościach wytwarzane są dwa typy popiołu, czyli popiół lotny (wychwytywany ze spalin) i popiół dolny opadający z rusztu grawitacyjnie. Globalnie mniejsza ilość popiołów powstaje obecnie ze spalania biomasy w kotłach fluidyzacyjnych niż w tradycyjnych instalacjach rusztowych. Jarosz-Krzemińska i Poluszyńska (2020) badając skład chemiczny takich popiołów zauważyły, że zawierają oprócz popiołu lotnego także materiały ze złoża

fluidalnego (głównie wapienie, ale także siarczan wapnia). Wspomniane powyżej Autorki są przekonane, że to właśnie instalacje spalania biomasy w złożu fluidalnym będą w przyszłości dominujące w naszym kraju bowiem tylko one będą w stanie zastąpić współcześnie działające kotły energetyczne w wielkich elektrowniach sieciowych i w dodatku przez energetyków uważane są za instalacje energetyczne czystego spalania. Stąd też konieczne jest podjęcie szczegółowych badań na temat popiołów generowanych w kotłach fluidalnych. Warto tu także wspomnieć, że odmienne od wszystkich innych ubocznych produktów spalania są stałe odpady generowane przez nieliczne jeszcze w naszym kraju instalacje wykorzystujące mniej technologicznie dojrzałe metody energetycznego wykorzystania biomasy takie jak jej zgazowanie czy piroliza.

Vassilev i in. (2013) podają, że biomasa w swoim składzie elementarnym w porównaniu do węgla zawiera więcej takich pierwiastków jak: Mn, K, P, Cl, Ca, O i H ale o wiele mniej innych takich jak: Al, C, Fe, N, S i Si. Poza tym ważna dla procesów spalania i składu chemicznego popiołów jest wyższa w biomacie niż w paliwach konwencjonalnych zawartość zarówno wody jak i substancji lotnych.

Najczęściej w czasie spalania biomasy powstają ziarna popiołu zbudowane z pierwiastków budujących jej mineralną frakcję takich jak: wapń, magnez, krzem, potas, glin, mikroskładniki (w postaci tzw. minerałów wtórnych), a w skład popiołu także wchodzi niespalona biomasa. Co do związków chemicznych budujących popioły biomasowe to szczególną uwagę należy zwrócić na węglany, ponieważ ich powstawanie w czasie spalania biomasy ma wielkie znaczenie środowiskowe. Powstają one w komorze spalania w reakcji syntezy CO<sub>2</sub> generowanego z utleniania związków organicznych i tlenków metali wchodzących w skład frakcji mineralnej biomasy i stąd uważa się, że spalanie biomasy ma podwójny efekt środowiskowy, bo uwalnia się wtedy CO<sub>2</sub>, który może być ponownie przyswojony przez rośliny, ale także dlatego, że jego część zostaje chemicznie związana w powstających właśnie w komorze spalania węglanach (Vassilev i in. 2013).

Losy lotnych frakcji niektórych pierwiastków takich jak: potas, sód, siarka, chlor i niektórych pierwiastków śladowych zależą od warunków spalania, często ich aerozole osadzone są na cząstkach stałych formującego się popiołu, ale bywa także, iż wydostają się do atmosfery zewnętrznej. Skład chemiczny i właściwości fizyczne popiołów w dużym stopniu zależą rzecz jasna od rodzaju spalanej biomasy, przyjmuje się, że fitopopioły generowane ze spalania biomasy roślin jednorocznych różnią się od tych, które pochodzą z instalacji spalających biomasę leśną. Najczęściej w literaturze przedmiotu zwraca się

uwagę na mniejszą zawartość pierwiastków śladowych w popiołach z biomasy roślin jednorocznych w porównaniu do spalania biomasy roślin wieloletnich (Szostek i in. 2023). Wynika stąd jednoznacznie, że trudno mówić o „typowym” popiele ze spalania biomasy ponieważ tak wiele czynników wpływa na skład chemiczny tego produktu spalania biomasy.

Chociaż uważa się, że popioły biomasowe zawierają w swoim składzie niewiele toksycznych dla życia metali ciężkich, co jak wiadomo w dużej mierze ogranicza wykorzystanie przyrodnicze popiołów ze spalania węgla to jednak Vassilev i in. (2014) podają, że w popiołach biomasowych wykrywano następujące ilości pierwiastków śladowych, które okazały się wyższe niż odpowiednie wartości dla popiołów węglowych: Ag (18 mg kg<sup>-1</sup>), Al (28,3%), As (0,16%), Au (25 mg kg<sup>-1</sup>), Ba (2,07%), Ca (59,6%), Cd (657 mg kg<sup>-1</sup>), Cl (14,2%), Cr (0,20%), Cu (1,0%), Fe (25,4%), Hg (8,9 mg kg<sup>-1</sup>), K (52,8%), Mg (9,8%), Mn (12,0%), Mo (121 mg kg<sup>-1</sup>), Na (22,1%), Ni (0,11%), P (17,9%), Pb (5,0%), S (10,3%), Sb (362 mg kg<sup>-1</sup>), Se (86 mg kg<sup>-1</sup>), Si (44,1%), Sn (552 mg kg<sup>-1</sup>), Th (112 mg kg<sup>-1</sup>), Ti (16,5%), Tl (49 mg kg<sup>-1</sup>), U (42 mg kg<sup>-1</sup>), V (0,10%) i Zn (16,4%), a ilości niektórych pierwiastków okazały się tak wysokie, że popioły te mogły być użyte w metalurgii bowiem zawierały więcej metali niż najczęściej stosowane ich rudy. Należy jednak zaznaczyć, że powyżej podano wartości ekstremalne, niektóre popioły pochodziły ze spalania biomasy roślin pozyskanej z roślin z terenów zdegradowanych.

Boström i in. (2012) badali transformację fazy mineralnej biomasy do popiołu w czasie procesów termicznych i ich zdaniem proces ten jest bardziej skomplikowany niż dzieje się to w przypadku fazy mineralnej węgla, głównie ze względu na heterogenność biomasy jako takiej, ale także dlatego, że dynamika przemian tej frakcji biomasy jest uzależniona od samych warunków spalania. Wiadomo już, że biomasa pochodzenia rolniczego ma o wiele wyższą zawartość zarówno ważnych składników pokarmowych (potasu i fosforu w szczególności, ale i krzemu) jak i pierwiastków szkodliwych dla instalacji (jak chlor) w porównaniu do biomasy pochodzenia leśnego.

Co jak się wydaje jest wyjątkowo istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa środowiskowego w przypadku gospodarczego wykorzystania popiołów to forma chemiczna, w jakiej w popiołach obecne są zarówno składniki pokarmowe dla roślin jak i pierwiastki śladowe, wśród których jest wiele pierwiastków niebezpiecznych dla życia. Voshell i in. (2018) podają na podstawie przeglądu wielu publikacji na ten temat, że w popiołach biomasowych wykryto 79 pierwiastków, a z powodu różnych ograniczeń (głównie analitycznych, ale także dlatego, że zawartość niektórych pierwiastków nie jest poddawana

regulacjami prawnymi) badacze zajmowali się jedynie niektórymi z nich. Co jest charakterystyczne dla spalania zarówno biomasy jak i węgla to fakt, że w zdecydowaną większość ziarna popiołu stanowią wtórne minerały powstające w komorze spalania, wskutek tego zarówno pierwiastki toksyczne jak też i niektóre składniki pokarmowe występują w formach trwale związanych chemicznie i stąd są dość trudno przyswajalnych dla roślin. Rezultaty kosztownych i czasochłonnych badań mineralogicznych popiołów biomasowych są jak do tej pory nieliczne a w dodatku sprzeczne.

Obszerne zestawienie minerałów i form chemicznych pierwiastków występujących w takich popiołach przedstawiono w pracy Vassileva i in. (2014). Zwrócili oni uwagę na różnorodność form chemicznych niemal wszystkich pierwiastków tj. od chlorków, tlenków i wodorotlenków, substancji amorficznych, poprzez apatyty, węglany, siarczany, krzemiany (przy niskim udziale glinokrzemianów) aż do substancji o budowie zbliżonej do szkła. Dlatego też rzadko analizuje się w popiołach całkowitą zawartość pierwiastków istotnych dla rolnictwa i środowiska, a za najważniejszą cechę popiołów decydującą dla ich bezpiecznego rolniczego stosowania uznaje się wymywalność.

Niestety jak podają Maresca i in. (2017) nie ma jak do tej pory spójnej metodyki określenia tego najważniejszego dla rolniczego wykorzystania popiołów parametru i dlatego też porównanie wyników różnych (coraz ostatnio liczniejszych) badań jest niemożliwe. Na brak standardowej metody badania popiołów także w aspekcie ich wymywalności zwrócili także uwagę Freire i in. (2015). Wydaje się, że za najbardziej wiarygodną (choć dość skomplikowaną) metodą oceny wymywalności uchodzi analiza sekwencyjna zaproponowana przez fińskich badaczy. Warto tu podkreślić, że właśnie najdłuższe doświadczenia w analizie i w stosowaniu popiołów biomasowych (już od lat 30-tych XX wieku) notuje się w leśnictwie w Finlandii, kiedy to wprowadzono pierwsze regulacje dotyczące stosowania popiołów biomasowych (Pöykiö i in. 2012).

Podatność na wymywanie składników z popiołów biomasowych przedstawiono przez Uliasz-Bocheńczyk i in. (2015c) następująco: Cl > S > K > Na > Sr > Ni > Mn > Cd > Kr > Zn > Co > Si > Mo > Li > (Mg, Pb) > Ca > Cu > Ba > P > Se > Sb > Al > Fe > (Br, Hg) > (W, B, Sn, Ti, V), a względnie wysoka wymywalność związana jest z występowaniem w tego typu popiołach łatwo rozpuszczalnych chlorków (sylwit, halit), siarczanów (syngenit, ettringit, gips), tlenków (CaO) i wodorotlenków, a występuje tam niewielka ilość odpornych na wymywanie glinokrzemianów i innych minerałów szklitych. Wysoka wymywalność niektórych pierwiastków (o wiele wyższa niż w przypadku wymywalności z popiołów

węglowych) z fitopopiołów to właśnie główny powód potencjalnych problemów środowiskowych i powodów ograniczenia ich stosowania w rolnictwie. Jedną z metod minimalizacji wymywalności pierwiastków szkodliwych jest karbonizacja popiołów biomasowych czego jeszcze nie udało się osiągnąć w skali technicznej.

Wymywalnością składników pokarmowych z popiołów pochodzących z różnych elektrociepłowni w Polsce zajmowali się także Wilczyńska-Michalik i in. (2018). Zbadali oni wymywalność (w dość prostym teście z traktowaniem popiołów wodą dejonizowaną przez 24 h, który to wielu badaczy uznaje za całkowicie nieadekwatny do warunków występujących w realnych warunkach środowiskowych) szeregu popiołów biomasowych jak i mieszanych (otrzymanych z instalacji współpalania węgla i biomasy). Stwierdzono, że wymywalność pierwiastków śladowych (Zn, Cu, Ni, Pb i Cd) była wielokrotnie wyższa w przypadku popiołów z instalacji współpalania biomasy i węgla niż z popiołów wyłącznie biomasowych. Wyjątkiem w kilku próbkach popiołów biomasowych była wyższa wymywalność kadmu niż z popiołów mieszanych (biomaso – węglowych), co Autorzy uznali za skutek różnic w składzie mineralogicznym, ale także podkreślili konieczność dalszych badań w tym kierunku. Autorzy dostrzegli bowiem, że wymywalność większości pierwiastków śladowych była słabo skorelowana z ich ogólną zawartością, czyli ich zdaniem była ona uzależniona od formy chemicznej, w której występowały w popiołach.

Przechodząc do potencjalnej wartości nawozowej fitopopiołów ogólnie uznaje się, że zatrzymują one w sobie większość substancji mineralnych przyswojonych w czasie wegetacji roślin wykorzystanych następnie energetycznie, ale zawierają one także składniki mineralne deponowane na powierzchni roślin przez opady mokre i suche jak i pochodzące z zanieczyszczenia glebą biomasy powstające w czasie zbiorów roślin. Wśród makroskładników niezbędnych dla roślin w popiołach nie ma praktycznie w ogóle azotu natomiast zawartość fosforu i potasu może być zbliżona do niektórych nawozów mineralnych. Niezmiernie ważne dla losów pierwiastków tworzących główną masę popiołów jest to, jak były one związane z one materią organiczną biomasy. Na przykład w biomacie pozyskanej z szybko rosnących gatunków krzewiastych (wierzba i topola) występuje względnie dużo wapnia i potasu przy niewielkiej ilości fosforu, dla wapnia charakterystyczne jest występowanie zarówno w fazie materii organicznej jak i w mineralnej (głównie w postaci szczawianu wapnia), potas i fosfor występują najczęściej w biomacie drzewnej w postaci rozpuszczalnych w wodzie soli takich jak  $K_2HPO_4$ ,  $KH_2PO_4$ ,  $KCl$ , czy  $K_2SO_4$  i w formie połączeń z materią organiczną  $R-COO^-K^+$  (Hedayati i in. 2021).

Warto tu dodać, że pod względem chemicznych form fosforu w takich rolniczych produktach ubocznych (słoma, plewy, rdzenie kolby kukurydzy itp.) jest istotna różnica odróżniająca je od biomasy leśnej czy ogólnie mówiąc drzewnej bowiem w wymienionej odpadowej biomase rolniczej fosfor występuje głównie w postaci fitynianów.

Ochecova i in. (2014) zaznaczają, że aplikacja popiołów ze spalania biomasy do gleb wykorzystywanych rolniczo jest zdecydowanie najlepszym sposobem prowadzącym do recyklingu zarówno makroelementów takich jak: Ca, K, Mg, P, S jak wielu i mikroelementów zawartych w biomase. Trzy makroskładniki o najwyższej zawartości w popiołach, czyli wapń, magnez i potas występują zazwyczaj w formie węglanów, ponieważ podczas procesu spalania biomasy dochodzi o mineralizacji związków organicznych, a kationy zasadowe występujące w formie tlenkowej, dość szybko przechodzą w węglany w reakcji z ditlenkiem węgla pochodzącym ze spalin lub z powietrza. Autorzy ci stwierdzili, że dostępność tych pierwiastków dla roślin nawożonych popiołami zależy od trzech czynników: czyli dawki popiołów, ustaleniu się stanu równowagi chemicznej w glebie zależnej od jej odczynu jak i od aktywności mikrobiologicznej gleby.

Doświadczenie wazonowe wykazało, że stosowanie popiołu lotnego z biomasy drzewnej (materiału niekiedy o wysokiej zawartości potencjalnie toksycznych pierwiastków) może być korzystne nawet w potencjalnie zanieczyszczonych glebach. Stwierdzono, że nawet gdy w glebie, na której uprawiano pszenicę doszło pod wpływem dodatku popiołu biomasowego (w dawkach większych niż 1%) do wzrostu koncentracji pierwiastków szkodliwych to nie miało to wtedy żadnego wpływu na wzrost, plonowanie i skład chemiczny rośliny testowej. Zdaniem Ochecovej i in. (2014) najważniejszym tego powodem był wzrost odczynu gleby, co spowodowało spadek przyswajalności toksycznych metali ciężkich.

Demeyer i in. (2001) wykazali, że zastosowanie popiołu drzewnego jest najbardziej korzystne na glebach ubogich w składniki odżywcze i kwaśnych, ponieważ odpady te zawierają wysokie stężenia fosforu (P), wapnia (Ca), magnezu (Mg), potasu (K) i mikroelementów, w tym żelaza (Fe). Nawożenie popiołem może również stymulować mineralizację materii organicznej przez mikroorganizmy, co dodatkowo zwiększa dostępność składników odżywczych. Na przykład, w wyniku wysokiej depozycji atmosferycznej azotu i kwasów w połączeniu z niską zdolnością buforową i niskim wysyceniem kompleksu sorpcyjnego kationami zasadowymi, gleby leśne w środkowym Ontario wykazują silne zakwaszenie i zachodzą w nich niekorzystne zmiany cyklu azotu -

denitryfikacja (Gradowski i Thomas 2006). Dobrym tego przykładem jest Las Haliburton w południowo-środkowym Ontario, gdzie zasobność gleb w P i Ca była bardzo niska (Gradowski i Thomas 2006). W związku z tym stosowanie popiołu drzewnego w tym lesie i także w innych podobnych lasach w Kanadzie może znacząco wpłynąć na dostępność Ca, P i innych ważnych składników odżywczych w glebie, potencjalnie zwiększając produktywność i wpływając na zrównoważony rozwój lasów. Stężenie zawartości przyswajalnych kationów zasadowych Ca, Mg i K, a także P wzrosło niezależnie od rodzaju gleb po zastosowaniu popiołu biomasowego, a więc praktyka ta może pomóc w zwróceniu tych niezbędnych składników odżywczych do ekosystemu leśnego, z którego zostały one usunięte w wyniku zbioru biomasy leśnej. W przypadku niektórych kluczowych pierwiastków, takich jak P i Ca, całkowite stężenia w popiele, który został glebowo zastosowany, można z wysokim prawdopodobieństwem przewidywać wynikające z tego wzrost stężenia form przyswajalnych w glebie (Pugliese i in. 2014).

Liczne badania wykazały, że fitopopioły charakteryzują niską gęstość, wielką zawartość porów i ogromną powierzchnię wewnętrzną. Huang i in. (2024) przeprowadzili badania z zastosowaniem połączonego stosowania dwóch ubocznych produktów energetycznego wykorzystania biomasy, czyli fitopopiołów i biowęgla. Taka strategia wykazała wysoką efektywność, ponieważ podwyższeniu zasadowości gleby towarzyszyły korzystne zmiany fizycznych właściwości gleby.

Popioły biomasowe (pochodzące głównie z elektrowni na biomasę wykorzystujące kotły energetycznych o różnych mocach) to materiał odpadowy, który zwiększa pH gleby, a także zawartość głównych składników odżywczych, a co ważne zmniejsza dostępność aktywnego glinu i niektórych mikropierwiastków. Ponadto popiół z biomasy może zmniejszać dostępność różnych zanieczyszczeń w glebie co podkreślili Santás-Miguel i in. (2020). Badano także wpływ tego odpadu na mikrobiom gleby, wykazując przy tym głównie wzrost pH i wynikającą z tego stymulację biomasy drobnoustrojów, oddychania i generalny wzrost aktywności enzymatycznej.

Szerokie i prowadzone w bezpieczny sposób wykorzystanie popiołów lotnych powstających jako produkt odpadowy spalania biomasy byłoby korzystne nie tylko dla większych operatorów instalacji energetycznych, ale nawet dla gospodarstw domowych, gdzie spala się pellet. W większości przypadków w Republice Czeskiej obecnie materiały te są składowane na wysypiskach (Bradna i in. 2016).

Na podstawie wyników badań popiołów z biomasy energetycznej można klasyfikować na podstawie rodzaju spalanej biomasy. Wydaje się, że w świetle wyników tych badań cytowanych autorów, że wszystkie końcowe produkty spalania można zalecić do bezpośredniego stosowania do gleby. Popiół z biomasy dzięki swoim właściwościom fizykochemicznym oferuje nie tylko szeroki wachlarz potencjalnych zastosowań, a zamyka również obieg składników odżywczych poprzez ich powrót do gleby, zmniejsza składowanie takich materiałów i powoduje zmniejszenie wydatków na nawozy mineralne w produkcji rolnej. Tylko wtedy, jeśli popiół ze spalania biomasy powróci z powrotem do gleby, to wówczas produkcja energii z biomasy może być rzeczywiście zrównoważoną technologią.

Wykorzystanie popiołów z biomasy jako substytutu tradycyjnych nawozów wapniowych przyczynia się do rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym, a jednocześnie zapobiega składowaniu odpadów (Kurzemann 2024). Pomimo tego, że wcześniejsze badania wykazały, że popioły biomasowe mogą być stosowane jako zamiennik wapna to inni badacze stwierdzili znikome lub negatywne skutki takiej praktyki, ponieważ dochodziło do ograniczenia przemian azotu w glebie. Dlatego zaleca się zrównoważenie dawki popiołu nawożeniem azotem. Stąd też stosowanie popiołów wraz z nawozami organicznymi bogatymi w N, może przynieść dodatkowe korzyści, szczególnie w przypadku gleb kwaśnych, ponieważ wtedy zawartość składników odżywczych wzajemnie się uzupełnia. Stosowanie gnojowicy prowadzi do wzrostu plonu zielonej masy, a połączenie z popiołem drzewnym ( $3 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) dodatkowo zwiększa plon. Okazało się, że tylko jednoczesne stosowanie popiołu drzewnego z zewnętrznym źródłem P i K spowodowało wzrost plonów zielonej masy. Dodatek popiołów biomasowych może wpływać nie tylko na skład chemiczny gleby i plon paszy, ale także na parametry mikrobiologiczne, takie jak biomasa mikrobiologiczna gleby, aktywność i skład zbiorowisk. Właściwości mikrobiologiczne są czułymi wskaźnikami przy ocenie charakterystyki gleb. Stwierdzono szybki wzrost biomasy mikrobiologicznej w glebie, po którym nastąpił spadek dwa miesiące po zastosowaniu  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  popiołu drzewnego na glebę leśną. Perucci i in. (2008) stwierdzili, że aplikacja dawki  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$  popiołu do gleby użytkowanej rolniczo miało wyraźny wpływ na właściwości fizykochemiczne i mikrobiologiczne gleby, ale efekty zniknęły już w 12 miesięcy. Jeśli chodzi o skład zbiorowiska, Bang-Andreasen i in. (2020) wykazali, że zwiększenie dawki popiołu biomasowego z 3 do  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$  zmniejszyło liczebność grup kopiotroficznych Chitinophagaceae (Bacteroidetes) i Rhizobiales (Alphaproteobacteria) w glebie rolniczej.

Wykorzystanie fitopopiołów w rolnictwie jest ważne dla osiągnięcia recyklingu niezbędnych składników odżywczych do gleby, chociaż niestety stopień ich wykorzystania w rolnictwie jest obecnie nadal niski (Stankowski i in., 2021; Wang i in. 2024). Z trzech podstawowych składników stosowanych w nawozach (NPK), fitopopioły mogą być znaczącym źródłem jedynie potasu (Demeyer i in., 2001; Odziejewicz i wsp., 2023). Stężenie potasu zależy od rodzaju spalanego paliwa z biomasy, a najwyższe stężenia potasu stwierdzono dla fitopopiołów ze spalania słomy (Vassilev i in., 2013). W ten sposób K zawarty w popiele z odpadów rolniczych jest zwracany do gleby wraz z innymi składnikami odżywczymi roślin, takimi jak fosfor (P), wapń (Ca) i magnez (Mg) a co przy tym wydaje się bardzo ważne popioły biomasowe wykazują zazwyczaj niską zawartością niebezpiecznych środowiskowo metali ciężkich.

W badaniach Wanga i in. (2024) wykazano, że poprawa wydajności fotosyntezy i szybszy rozwój korzeni w roślinach tytoniu wskutek dodatku fitopopiołu zasobnego w potas ostatecznie doprowadziły do zwiększenia biomasy roślin, co przypisano zmienionym właściwościom fizykochemicznym i biologicznym gleby oraz co wykazano pierwszy raz przy badaniu wpływu popiołów biomasowych także zmianie dystrybucji auksyny w roślinach. Te odkrycia pomagają zrozumieć potrójną korzyść wykorzystania fitopopiołu w systemie rolniczym, czyli: (1) poprawa właściwości gleby; (2) większa produkcja roślinna; (3) redukcja potencjalnych problemów środowiskowych.

Popiół generowany z bogatej w wapń i potas biomasy drzewnej zawiera zarówno różne węglany czy dwuwęglany wapnia i/lub wapnia i potasu, ale w przypadku wyższej temperatury spalania w popiołach z takich instalacji pojawiają się minerały o charakterze apatytów ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ) czy ( $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ). Formy występowania podstawowych makroskładników w popiołach biomasowych intensywnie badali Díaz-Ramírez i in. (2014) na przykładzie popiołu wytworzonego ze spalania biomasy topoli generowanego w trakcie spalania w temperaturze 500–600°C i stwierdzili oni, że w takich warunkach Ca i P występowały w fazie krystalicznej jako  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , i także  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ . A co istotne wykazano w tej pracy, że w wyższych temperaturach spalania tj. około 1000°C aż 25% potasu zawartego w biomacie przechodziła do fazy gazowej natomiast w fazie gazowej spalin nie stwierdzano obecności fosforu. Z badań tych wynika, że ze względu na swój skład popioły biomasowe mogą znaleźć efektywne zastosowanie jako substytuty nawozów fosforowych i wykazują działanie odkwaszające, co w warunkach naszego kraju, gdzie przeważają gleby podatne na zakwaszenie może przynieść korzyści.

Ogólnie rzecz biorąc, popioły biomasowe są zasadowe, o pH zwykle przekraczającym wartość 12 i składają się z mieszanin tlenków, węglanów, krzemianów i soli. Popiół może zawierać duże ilości kationów zasadowych, mikroelementów i metali, a także P, podczas gdy zawartości C, N i S są zwykle minimalne i zmieniają się w zależności od stopnia wypalenia biomasy podczas spalania. Popiół może przeciwdziałać zakwaszeniu gleb w taki sam sposób jak wapnowanie, ze względu na zawartość zarówno tlenku jak i węglanu. Pomimo wysokiego potencjału nawozowego jak i regulowania odczynu gleby, zastosowanie biopopiołów w rolnictwie było w przeszłości ograniczone ze względu na potencjalne działania niepożądane, ponieważ niektóre badania wykazały podwyższone ilości metali ciężkich w popiele, podczas gdy inne wskazują na bezproblemowe poziomy (Ondrasek i in. 2021). Badanie procesów regulujących dostępność składników odżywczych dla roślin, mobilność metali ciężkich i funkcjonowanie ekosystemu ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa praktyki nawożenia popiołem. Ogólnie rzecz biorąc, procesy te są w dużym stopniu regulowane przez pH, dlatego ważne jest, aby zrozumieć i prawidłowo określać, jak zmienia się pH gleby po zastosowaniu popiołu przy różnej głębokości gleby i krótszych ramach czasowych niż ma to miejsce obecnie w większości badań.

Ponieważ popiół może zawierać stosunkowo duże ilości metali ciężkich i innych pierwiastków śladowych, ważne jest, aby zrozumieć ich losy w systemie glebowym. pH jest znane jako czynnik decydujący o kształtowaniu społeczności i funkcji mikroorganizmów glebowych w różnych typach gleb. Na strukturę zbiorowiska drobnoustrojów i procesy zachodzące w wyniku mikroorganizmów, niezbędne dla ekosystemu glebowego, mogą zatem wpływać zmiany pH wywołane stosowaniem popiołów biomasowych, a w kilku badaniach stwierdzono, że pH jest jednym z głównych czynników wyjaśniających obserwowane reakcje mikrobiologiczne w glebie po zastosowaniu biopopiołów drzewnego

Uważa się, że fitopopioły z powodu ich alkalicznego odczynu mogą nie tylko zastępować one mogą tradycyjnie nawozy wapniowe to jeszcze ich stosowanie może ograniczać przyswajalność większości szkodliwych pierwiastków śladowych, które najbardziej ruchliwe są w warunkach zakwaszenia gleby. Jednak Mercl i in. (2016) zwracają uwagę na fakt, że na proces rozkładu minerałów popiołu następujący w glebie jest kompleksowy i silnie zależny od rodzaju fitopopiołów, a najważniejszym parametrem procesu powstawania popiołów jest temperatura spalania biomasy, bo to właśnie ona warunkuje skład mineralogiczny i to z kolei determinuje tempo przechodzenia składników

z form chemicznie biernych do przyswajalnych dla roślin. Autorzy ci doszli do wniosku, że w badaniach inkubacyjnych i laboratoryjnych bardzo trudno było przewidzieć reakcje zachodzące w układzie gleba – roślina uprawna.

Ten wniosek zgadza się z wynikami doświadczeń polowych prowadzonych przez Arshada i in. (2012), którzy wykazali, że odkwaszający efekt zastosowania popiołów ze spalania odpadów leśnych jest przede wszystkim zależny od składu chemicznego, ale również i od uziarnienia zastosowanych popiołów.

Badania nad efektem plonotwórczym zastosowania fitopopiołów nie są jak do pory prowadzone systematycznie przy użyciu popiołów różnorodnego pochodzenia i przy zastosowaniu różnych roślin testowych. W doświadczeniu polowym przeprowadzonym przez Pattersona i in. (2004) popioły ze spalania biomasy leśnej spowodowały istotny wzrost plonów jęczmienia jarego (o 50%) i rzepaku jarego nawet o 124%, czyli ich zastosowanie okazało się niezwykle efektywne rolniczo. Schiemenz i Eichler-Löbermann (2010) zwróciły uwagę na aktywną rolę samych roślin w remobilizacji składników pokarmowych ze szczególnym uwzględnieniem uruchamiania fosforu.

Jeśli chodzi o szerokie przyrodnicze stosowanie fitopopiołów to szczególną rolę pełnią one w leśnictwie i tak w Danii, gdzie pellet i odpady drzewne są od dawna i bardzo szeroko wykorzystywane do produkcji energii cieplnej i elektrycznej. Dawki popiołów ustalane są w zależności od zapotrzebowania na składniki pokarmowe i od parametru popiołu, którym jest przewodnictwo wyciągu wodnego popiołu (ochrona przed zasoleniem gleb leśnych) a maksymalna pojedyncza dawka nie może być wyższa niż 3 Mg ha<sup>-1</sup> raz na 10 lat, ale stosowana może być nie częściej niż trzy razy na 75 lat (Maresca i in. 2017).

W naszym kraju jak już wspomniano popioły traktowane są jako odpady, a ich wykorzystanie dogłębne określone jest procesem R10, którego warunki brzegowe określa 476 Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 5 kwietnia 2011 r. Ponadto popioły mogą być aplikowane jedynie do tych gleb i w takich dawkach, które spełniają warunki Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie jakości gleb. Rozporządzenia te mają zapewnić brak wzbogacenia gleb rolniczych w dostępne dla roślin metale ciężkie. Mając to na względzie Gibczyńska i in. (2014) w swoich badaniach polowych nad stosowaniem popiołu ze spalania biomasy leśnych w uprawie pszenicy i jęczmienia stwierdzili zarówno jego przydatność, a zmian zawartości pierwiastków śladowych w analizowanej glebie takich jak nikiel, miedź i kadm w glebie pod wpływem dawki tego popiołu w wysokości 1,5 Mg ha<sup>-1</sup> w zasadzie nie odnotowano.

Z kolei Meller i Bilenda (2012) podjęli badania nad fitopopiołami otrzymanymi z elektrociepłowni, która spalała zrębki drzewne, wierzbę energetyczną, kukurydzę i słomę stosowanymi w relatywnie wysokich dawkach tj.: 3,5; 7,00 i 10,5 Mg ha<sup>-1</sup> jako substytutu nawożenia potasowego. W doświadczeniu polowym wykazano pozytywny wpływ popiołu na zawartość przyswajalnych dla roślin fosforu, potasu i magnezu i zwiększył się poziom wysycenia kationami kompleksu sorpcyjnego.

Wacławowicz (2022) określił wpływ stosowania popiołów biomasowych na ryzyko pojawiania się chorób podstawy źdźbła u pszenicy. Znany jest od dawna dość ścisły związek pomiędzy podatnością pszenicy na te choroby i podwyższeniem pH gleby wskutek wapnowania. Ponieważ popioły biomasowe zastosowane w doświadczeniu wykazywały także właściwości odkwaszające to stwierdzono zwiększone porażenie korzeni, ale co znamienne porażenie podstawy źdźbła pod wpływem popiołów zmniejszyło się, co wg cytowanego Autora jest dobrym prognostykiem dla szerokiego nawozowego stosowania popiołów w aspekcie zdrowotności roślin.

Wśród produktów, które otrzymywane są z biomasy szczególne duże zainteresowanie od dwóch dekad budzi biowęgiel, stały produkt pirolizy biomasy, w czasie tego procesu powstają paliwa ciekłe i gazowe jako produkty główne. Ale biowęgiel (zwany niekiedy fitowęgłem) był tradycyjnie wykorzystywany już 2000 lat temu przez Indian Amazońskich i jego długoletnie zastosowanie stworzyło niezwykle żyznej gleby nazwanej *Terra preta di Indios* (czyli czarnoziem indiański). Malińska (2012) zaznacza, że substratami do produkcji biowęgla jest cała paleta odpadów rolnych, biomasa lignocelulozowa a także niezmiernie trudne do zagospodarowania odpady jak osady ściekowe przez co nie są one składowane na Obecnie rozumiano głębiej fenomen działania biowęgla (trwała forma węgla nie zawierająca substancji pokarmowych dla roślin a jednak znacznie zwiększająca możliwości produkcyjne gleb) i bada się jego działanie w wielu ośrodkach naukowych. Brassard i in. (2016) szczególną uwagę zwracają na poprawę właściwości fizycznych gleb pod wpływem biowęgla (zwiększenie stopnia porowatości). Wolański i in. (2024) w swoich badaniach doszli do wniosku, że biowęgiel w zależności od warunków jego produkcji jak i substratów tam stosowanych może być uważany jako wydajny bioabsorbent.

Generalnym wnioskiem z wielu badań w różnych ośrodkach naukowych jest stwierdzenie, że biowęgiel stanowi substancję o ogromnej powierzchni wewnętrznej zawierającej ładunki elektryczne, a przez to stanowi pewnego rodzaju „bufor” chroniących glebę przed gwałtownymi zmianami odczynu czy zmianami zawartości jonów w roztworze

glebowym. Jednak najważniejszą jak się wydaje funkcją biowęgla w glebie jest to, że ta wielka powierzchnia biowęgla daje „niszę”, w której chronią się organizmy glebowe (od mikroorganizmów do nicieni) i dzięki temu gleba może zyskać zwiększenie aktywności biologicznej.

Te mikro-nisze zapewniają ochronę przed niekorzystnymi warunkami środowiskowymi, stabilizują dostępność składników pokarmowych i umożliwiają rozwój złożonych interakcji mikrobiologicznych. W rezultacie, obecność biowęgla w glebie często koreluje ze wzrostem aktywności enzymatycznej oraz poprawą procesów biologicznego rozkładu materii organicznej, co przekłada się na wyższą żyzność gleby i jej potencjał produkcyjny.

Biowęgiel wykazuje ograniczone właściwości nawozowe – zawiera relatywnie niewielkie ilości łatwo dostępnych pierwiastków mineralnych. W tym zakresie uzupełnieniem funkcji biowęgla może być popiół z biomasy, który choć pozbawiony struktury porowatej i materii organicznej, stanowi bogate źródło składników mineralnych – zwłaszcza wapnia, potasu, fosforu i magnezu. Co więcej, jego silnie zasadowy odczyn czyni go skutecznym środkiem odkwaszającym glebę, podobnie jak klasyczne nawozy wapniowe.

W odróżnieniu od biocharu, którego wpływ na środowisko glebowe jest głównie pośredni (poprzez modyfikację struktury, wilgotności i mikrobiomu), popiół oddziałuje bezpośrednio na chemiczne właściwości gleby, w tym pH, zawartość składników odżywczych i stopień przyswajalności pierwiastków. O ile biowęgiel może poprawiać funkcje biologiczne i retencyjne gleby, o tyle popiół – przy odpowiednio kontrolowanym składzie – może być źródłem łatwo dostępnych składników pokarmowych oraz czynnikiem ograniczającym mobilność toksycznych metali ciężkich, szczególnie w glebach kwaśnych.

Tym samym, zastosowanie popiołu z biomasy może być traktowane jako uzupełnienie działania biowęgla, w ramach zintegrowanego podejścia do rekultywacji i poprawy jakości gleb. Kluczowym wyzwaniem pozostaje jednak zróżnicowanie właściwości popiołów, wynikające z rodzaju surowca i parametrów spalania, co wymaga każdorazowej analizy ich składu chemicznego i potencjalnego wpływu na środowisko.

## **2. ROZEZNANIE RYNKU BIOMASY ENERGETYCZNEJ W OTOCZENIU FIRMY POLMOS ŻYRARDÓW ORAZ WYTYPOWANIE BIOMASY DO BADAŃ**

### **2.1. Przemysł rolno-spożywczy i klasyfikacja odpadów**

Struktura przemysłu rolno-spożywczego w Polsce charakteryzuje się znacznym rozdrobnieniem organizacyjnym oraz dominacją małych i średnich przedsiębiorstw (MŚP). Taka konfiguracja branży wpływa na ograniczoną zdolność do systemowej identyfikacji i oceny skali problemów środowiskowych, w tym związanych z wytwarzaniem oraz zagospodarowaniem odpadów produkcyjnych. Rodzaj i ilość generowanych odpadów są silnie zróżnicowane i zależą od szeregu czynników, takich jak profil działalności zakładu, jego wielkość, charakterystyka procesów oraz zastosowane rozwiązania technologiczne.

Sektor rolno-spożywczy generuje szeroką gamę odpadów organicznych i nieorganicznych, a także produktów ubocznych, które – przy odpowiednim zagospodarowaniu – mogą stanowić cenne surowce wtórne. W tabeli 3. przedstawiono wybrane typy zakładów przetwórstwa rolno-spożywczego wraz z charakterystyką generowanych przez nie odpadów oraz potencjalnych produktów ubocznych.

Odpady i pozostałości pochodzenia biologicznego z przetwórstwa rolno-spożywczego zaliczane są do biomasy. Zgodnie z definicją biomasa oznacza ulegającą biodegradacji frakcję produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa, łącznie z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi, z leśnictwa i powiązanych działów przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, a także ulegającą biodegradacji frakcję odpadów, w tym odpadów przemysłowych i miejskich pochodzenia biologicznego (Dyrektywa, UE 2018/2021). Z kolei biomasa pochodzenia rolniczego oznacza biomasę pochodzącą z upraw energetycznych, a także odpady lub pozostałości z produkcji rolnej oraz przemysłu przetwarzającego jej produkty (Ustawa z 07.06.2018).

Biomasa stanowi jedno z kluczowych odnawialnych źródeł energii, które zyskuje na znaczeniu w kontekście transformacji energetycznej oraz dążenia do ograniczenia zależności od paliw kopalnych. W porównaniu do konwencjonalnych surowców energetycznych, takich jak ropa naftowa, energia uzyskiwana z biomasy charakteryzuje się relatywnie niższymi kosztami produkcji, a także korzystniejszym bilansem w zakresie emisji gazów cieplarnianych.

**Tabela 3.** Typowe odpady i produkty uboczne z różnych gałęzi przemysłu.

Rodzaj zakładu przetwórczego	Typowe odpady produkcyjne	Potencjalne produkty uboczne
<b>Zakłady przetwórstwa mięsnego</b>	Tkanki niejadalne (kości, tłuszcz, krew), treści przewodu pokarmowego, odpady poprodukcyjne	Mączka mięsno-kostna, tłuszcz techniczny, żelatyna, komponenty paszowe
<b>Zakłady mleczarskie</b>	Ścieki mleczarskie, osady z oczyszczalni, opakowania zanieczyszczone resztkami mleka	Serwatka, komponenty do produkcji biogazu, odpady mleczne przetwarzane na pasze
<b>Zakłady przetwórstwa owocowo-warzywnego</b>	Skórki, pestki, resztki roślinne, odpady opakowaniowe, owoce i warzywa niezdatne do spożycia	Wytłoki, pulpy owocowo-warzywne, susz owocowo-warzywny, naturalne barwniki
<b>Zakłady tłuszczowe (olejarnie)</b>	Łuski, odpady z filtracji i rafinacji oleju, osady technologiczne	Makuchy, śruta oleista, gliceryna techniczna
<b>Młyny i zakłady przetwórstwa zbóż</b>	Pyły przemiałowe, plewy, frakcje odpadowe po czyszczeniu, łodygi kukurydzy, rdzenie kolb kukurydzy, słoma, niezagospodarowane lub zanieczyszczone zbiory zbóż	Otręby, kielki zbóż, komponenty paszowe
<b>Browary i gorzelnie</b>	Ścieki przemysłowe, osady drożdżowe, zużyte złoża filtracyjne	Wysłodziny, młóto browarniane, biomasa drożdżowa wykorzystywana jako pasza, wywar pogorzelniany, porektyfikat
<b>Zakłady cukrownicze</b>	Melasa odpadowa, błoto wapienne, ścieki technologiczne	Wysłodki buraczane, trociny buraczane, melasa jako substrat fermentacyjny
<b>Zakłady przetwórstwa rybnego</b>	Ości, skóry, wnętrzności, woda poprodukcyjna o wysokim ładunku organicznym	Mączka rybna, tłuszcz rybny, komponenty do produkcji pasz lub olejów technicznych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie zestawienia z Ministerstwa Klimatu i Środowiska o wytworzonych odpadach w 2021 roku.

Postępujące wyczerpywanie się globalnych zasobów ropy naftowej oraz wzrost jej cen na rynkach światowych powodują, że biomasa staje się bardziej konkurencyjną i opłacalną alternatywą. Oprócz aspektu ekonomicznego, istotna jest również większa stabilność podaży biomasy – szczególnie w warunkach lokalnych – co przekłada się na bezpieczeństwo energetyczne.

Wykorzystanie biomasy jako paliwa odnawialnego wpisuje się także w cele unijnej i krajowej polityki klimatyczno-energetycznej, w tym m.in. realizację celów określonych w Europejskim Zielonym Ładzie, dyrektywie RED II, a także strategiach neutralności klimatycznej. Odpady generowane są przez społeczeństwo nieustannie, stąd materiały organiczne wykorzystywane jako biomasa są nieograniczone. Wykorzystanie biomasy

powinno odbywać się w jak najmniejszej odległości od jej powstawania po to, aby jej transport nie wpływał negatywnie na środowisko (Chmielowiec, 2020).

W kontekście energetycznego wykorzystania biomasy kluczowe znaczenie ma preferowanie frakcji odpadowych i pozostałości produkcyjnych, które nie znajdują konkurencyjnego zastosowania w innych sektorach gospodarki (np. przemysł spożywczy, paszowy, materiałowy). Taki wybór sprzyja zarówno realizacji celów zrównoważonego rozwoju, jak i wdrażaniu zasad gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ).

Najczęściej wykorzystywane w celach energetycznych są:

- odpady organiczne powstałe w przemyśle rolno-spożywczym,
- drewno niepełnowartościowe oraz odpady drzewne,
- pozostałości z zabiegów pielęgnacyjnych w sadach i lasach (np. gałęzie, liście, zrębki),
- osady ściekowe (o odpowiednich parametrach kalorycznych),
- odpady z produkcji roślinnej i warzywnej (np. liście, łodygi, wytloki, plewy).

Zróżnicowanie źródeł biomasy wymaga jej klasyfikacji według trzech podstawowych kryteriów, tj. pochodzenia, stopnia przetworzenia oraz stanu skupienia. Zestawienie to przedstawiono w tabeli 4.

**Tabela 4.** Klasyfikacja biomasy.

<b>Kryterium podziału</b>	<b>Rodzaje</b>
<b>Pochodzenie biomasy</b>	- leśne (drewno opałowe grube, drobnica gałęziowa, odpady m.in. chrust, igliwie, kora, ścinki; pozostałości z zakładu przemysłu drzewnego m.in. trociny, pyły, wióry), - rolnicze (słoma, siano, buraki cukrowe, trzcina cukrowa, ziemniaki, rzepak, pozostałości przerobu owoców, odchody zwierzęce), - odpadowe (trociny, kora migdałowca, odcięte gałęzie drzew owocowych, ścieki przemysłowe, odpady hodowlane m.in. puryny).
<b>Stopień przetworzenia</b>	- pierwotne (drewno, słoma, osady ściekowe), - przetworzone (biogaz, etanol, metanol, estry oleju rzepakowego, makulatura).
<b>Stan skupienia</b>	- stałe (drewno opałowe: zrębki, trociny, ścinki, wióry, brykiety, pelety; pozostałości z rolnictwa: słoma zbóż, rzepaki i trawy, osady ściekowe odwodnione, rośliny energetyczne drzewiaste i trawiaste; inne, w tym makulatura), - gazowe (biogaz rolniczy, biogaz z fermentacji odpadów przetwórstwa spożywczego, biogaz z fermentacji osadów ściekowych, biogaz, gaz wysypiskowy, gaz drzewny), - ciekłe (etanol, metanol, paliwa płynne z drewna: benzyna, biooleje).

Źródło: Opracowanie własne na podstawie literatury (Gołębiowska, 2013).

W elektrociepłowni w Polmos Żyrardów Sp. z o.o. spalane są takie rodzaje biomasy jak:

- zrębka z drzew liściastych (pochodzi w 100% z drewna niepełnowartościowego),
- zrębka z drzew iglastych (pochodzi w 100% ze zrównoważonej gospodarki leśnej z drewna, które nie znalazło zastosowania w przetwórstwie i przemyśle drzewnym),
- zrębka z drewna odpadowego (pochodzi w 100% z drewna, które nie znalazło zastosowania w meblarstwie i budownictwie oraz przeznaczonego na opał),
- rdzenie kolb kukurydzy (pozostałość rolnicza, resztki poźniwne),
- wywar pogorzelniczny (produkt uboczny powstający przy produkcji spirytusu, gęsty odciek z procesu fermentacji, mocno uwodniony o 30 % zawartości suchej masy),
- surowce zebrane na terenie zakładu m.in. liście, skoszona trawa, kasztany.

Biomasa przyczynia się do lepszej gospodarki odpadami, z tego powodu jej wykorzystanie do celów energetycznych można traktować jako pozytywny aspekt. Warto zapoznać się z klasyfikacją odpadów, która została wprowadzona w celu określenia rodzaju odpadów i sposobów ich utylizacji. Polega ona na przypisaniu odpadów do odpowiedniej grupy, podgrupy i rodzaju odpadów, uwzględniając: źródło ich powstawania; właściwości powodujące, że odpady są zaliczane do niebezpiecznych; składniki odpadów, dla których przekroczenie wartości granicznych stężeń substancji niebezpiecznych może powodować, że odpady są odpadami niebezpiecznymi (Ustawa z 14.12.2012). Przydzielenie właściwego kodu odpadom pozwala na prawidłowe gospodarowanie odpadami.

Wyróżnia się 20 grup odpadów ze względu na źródło ich powstawania. Kod odpadu określający rodzaj odpadu składa się z sześciu cyfr. Dwie pierwsze cyfry kodu oznaczają grupę odpadów wskazującą źródło powstawania odpadów. Oznaczenie grupy odpadów łącznie z dwiema następnymi cyframi identyfikuje podgrupę odpadów, natomiast kod składający się z sześciu cyfr identyfikuje rodzaj odpadów (Rozporządzenie z 02.01.2020).

W tabeli 5. przedstawiono najważniejsze rodzaje odpadów, które mogą stać się biomasą zdatną do spalania w elektrociepłowniach.

**Tabela 5.** Rodzaje biomasy odpadowej.

<b>Kod</b>	<b>Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów</b>
<b>02</b>	<b>Odpady z rolnictwa, ogrodnictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności</b>
02 01	Odpady z rolnictwa, ogrodnictwa, upraw hydroponicznych, leśnictwa, łowiectwa i rybołówstwa
02 01 03	Odpadowa masa roślinna
02 01 07	Odpady z gospodarki leśnej
02 02	Odpady z przygotowania i przetwórstwa produktów spożywczych pochodzenia zwierzęcego
02 02 04	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków
02 03	Odpady z przygotowania, przetwórstwa produktów i używek spożywczych oraz odpady pochodzenia roślinnego, w tym odpady z owoców, warzyw, produktów zbożowych, olejów jadalnych, kakao, kawy, herbaty oraz przygotowania i przetwórstwa tytoniu, drożdży i produkcji ekstraktów drożdżowych, przygotowywania i fermentacji melasy (z wyłączeniem 02 07)
02 03 01	Szlamy z mycia, oczyszczania, obierania, odwirowywania i oddzielania surowców
02 03 04	Surowce i produkty nienadające się do spożycia i przetwórstwa
02 03 05	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków
02 03 80	Wytłoki, osady i inne odpady z przetwórstwa produktów roślinnych (z wyłączeniem 02 03 81)
02 03 81	Odpady z produkcji pasz roślinnych
02 03 82	Odpady tytoniowe
02 04	Odpady z przemysłu cukrowniczego
02 05	Odpady z przemysłu mleczarskiego
02 06	Odpady z przemysłu piekarniczego i cukierniczego
02 07	Odpady z produkcji napojów alkoholowych i bezalkoholowych (z wyłączeniem kawy, herbaty i kakao)
<b>03</b>	<b>Odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury</b>
03 01	Odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli
03 01 01	Odpady kory i korka
03 01 05	Trociny, wióry, ścinki, drewno, płyta wiórowa i fornir inne niż wymienione w 03 01 04
03 01 82	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków
03 02	Odpady powstające przy konserwacji drewna
03 03	Odpady z produkcji oraz z przetwórstwa masy celulozowej, papieru i tektury

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Rozporządzenia Ministra Klimatu z dnia 02.01.2020 r.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2020 poz. 10), większość odpadów pochodzących z sektora rolno-spożywczego klasyfikowana jest w obrębie grupy 02 – Odpady z rolnictwa, ogrodnictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności. Kategoria ta obejmuje szeroki wachlarz frakcji odpadowych o charakterze organicznym i biodegradowalnym, powstających zarówno w procesach pierwotnych (np. uprawa i zbiory), jak i wtórnych (przetwórstwo produktów roślinnych i zwierzęcych).

Szczególnej uwagi wymaga również grupa 03, która obejmuje odpady powstające w przemyśle przetwórczym drewna i celulozy. Znajdują się tu m.in.:

- Odpady kory i korka (kod 03 01 01),
- Trociny, wióry, ścinki oraz inne odpady drewniane niepoddane obróbce chemicznej (kod 03 01 05),
- Drewno odpadowe nie zawierające zanieczyszczeń chemicznych.

Odpady z tej grupy, ze względu na swój wysokokaloryczny i suchy charakter, mogą być z powodzeniem wykorzystywane jako biopaliwo, zarówno w formie nieprzetworzonej, jak i po odpowiedniej obróbce fizycznej (brykietowanie, peletyzacja, suszenie).

## **2.2. Biomasa możliwa do wykorzystania w technologii spalania oraz analiza rynku biomasy**

Elektrociepłownia Polmos Żyrardów Sp. z o.o. wykorzystuje w procesie energetycznym głównie biomasę roślinną, zgodnie z założeniami zrównoważonego rozwoju i polityki redukcji emisji gazów cieplarnianych.

W ramach analizy potencjalnych źródeł surowca opałowego, dokonano przeglądu katalogu odpadów pod kątem obecności kodów odpowiadających biomase możliwej do energetycznego wykorzystania. Spośród dostępnych pozycji wybrano odpady, które są technologicznie i środowiskowo odpowiednie do spalania w instalacjach zakładu – zarówno pod względem kaloryczności, jak i właściwości fizykochemicznych.

Dla każdego z wytypowanych kodów odpadów określono wymaganą formę obróbki wstępnej, umożliwiającą ich bezpieczne i efektywne wykorzystanie w procesie spalania (np. suszenie, rozdrobnienie, zagęszczenie, peletyzacja), przedstawiono to w tabeli 6.

**Tabela 6.** Biomasa możliwa do wykorzystania w technologii Polmos Żyrardów Sp. z o.o.

Kod odpadu, opis	Rodzaj biomasy	Metoda obróbki przed spalaniem			
		bez wstępnego przygotowania	rozdrobnienie do frakcji biomasy	suszenie	oczyszczenie
<b>02 01 03</b> <b>Odpadowa masa roślinna</b> - do wykorzystania jako paliwo lub do wykorzystania w przydomowych kompostownikach (dopuszcza się możliwość wykorzystania wyłącznie własnych odpadów – wytworzonych przez osobę fizyczną lub jednostkę organizacyjną niebędącą przedsiębiorcą, która dokonuje ich zagospodarowania). Przykładem może być odpadowa masa roślinna z produkcji rolnej.	wytłoki	X		X	
	wysłodki buraczane	X		X	
	obierki	X		X	
<b>02 01 07</b> <b>Odpady z gospodarki leśnej</b> – odpady tego typu powstają na obszarze leśnym, podczas prowadzenia takich prac jak wycinka drzew (ścięcie drzewa, odseparowanie gałęzi i konarów, cięcie pnia na mniejsze partie, wstępna obróbka na terenie lasu). W ich skład wchodzi: ścinki gałęzi drzew liściastych lub iglastych, liście, igliwie, kora drzewna, trociny. Miejscem powstawania odpadu są obszary lasu liściastego, iglastego lub mieszanego.	skrawki kory	X			
	trociny	X			
	zrębki	X			
<b>02 03 80</b> <b>Wytłoki, osady i inne odpady z przetwórstwa produktów roślinnych (z wyłączeniem 02 03 81)</b> - mogą to być odpady pochodzące z produkcji soków, przetwórstwa owocowo-warzywnego, roślinne z przetwórstwa spożywczego.	wytłoki z owoców i warzyw	X		X	
	gniazda nasienne, skórki, szypułki	X			
	pestki	X			
	liście	X			
	łodygi pomidora		X		
	kasztany			X	
<b>03 01 01</b> <b>Odpady kory i korka</b> – odpady drzewne pochodzące z przemysłu drzewnego, papirniczego i meblarskiego, powstają głównie podczas przetwarzania drewna.	kora	X			
	korek	X			
<b>03 01 05</b> <b>Trociny, wióry, ścinki, drewno, płyta wiórowa i fornir inne niż wymienione w 03 01 04</b> (niedopuszczalne płyty wiórowe i fornirowane oraz materiały zawierające impregnaty, lakiery itp.)	trociny	X			X
	wióry	X			X
	ścinki	X			X
	drewno		X		

Źródło: Opracowanie własne.

Na podstawie dostępnych danych dotyczących wytwarzania odpadów w 2021 roku, udostępnionych przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska, przeprowadzono analizę mającą na celu identyfikację potencjalnych strumieni biomasy odpadowej możliwej do zagospodarowania w technologii wykorzystywanej przez Polmos Żyrardów Sp. z o.o.

W pierwszym etapie analizy wyodrębniono kody odpadów odpowiadające frakcjom organicznym, które mogą być uznane za biomasę zdatną do dalszego przetwarzania (np. fermentacji, destylacji lub współspalania). Każdy z wytypowanych kodów odpadów został następnie przefiltrowany oddzielnie dla każdego z dwóch analizowanych województw (nazwa województw do uzupełnienia), a otrzymane dane zostały uszeregowane malejąco względem ilości wytworzonych odpadów (wyrażonych w tonach metrycznych – Mg).

W dalszym etapie przeprowadzono selekcję danych pod kątem skali działalności – odrzucono jednostki, których roczna ilość danego odpadu nie przekraczała 30 Mg. Działanie to miało na celu wyeliminowanie źródeł rozdrobnionych, potencjalnie nieefektywnych pod względem logistycznym i ekonomicznym.

Na podstawie oczyszczonego zestawienia dokonano agregacji danych, obliczając sumą wytworzonych odpadów dla każdego z kodów odpadów, jak również łączne wartości dla każdego z województw. Zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 7.

**Tabela 7.** Biomasa odpadowa z województwa łódzkiego i mazowieckiego.

Kod odpadu	Rodzaj odpadu	Masa [Mg]	Liczba wytwórców	Województwo	Grupa zakładów
02 01 03	Odpadowa masa roślinna	14 626	13	łódzkie i mazowieckie	Producenci cukru, warzyw, owoców, surówek, dystrybutorzy świeżych owoców i warzyw, a także zakłady przetwórcze, gospodarstwa warzywniczo-przetwórcze, suszarnie, hurtownie
02 01 07	Odpady z gospodarki leśnej	31	1	mazowieckie	Przedsiębiorstwo budownictwa elektroenergetycznego
02 03 80	Wytłoki, osady i inne odpady z przetwórstwa produktów roślinnych (z wyłączeniem 02 03 81)	75 861	30	łódzkie i mazowieckie	Zakłady zajmujące się produkcją owoców jak i warzyw, a także produkcją koncentratów, suszonych oraz mrożonych owoców. Przedsiębiorstwa oferują owoce świeże gotowe do sprzedaży

<b>03 01 01</b>	Odpady kory i korka	389	1	mazowieckie	Podstawowym przedmiotem działalności firmy jest produkcja wyrobów tartacznych świeżo ciętych i suszonych, kantówki okiennie-drzwiowej, deski tarasowej, boazerii, deski szalunkowej, pelletu drzewnego, kory drzewnej, opału
<b>03 01 05</b>	Trociny; wióry; ścinki; drewno; płyta wiórowa i fornir inne niż wymienione w 03 01 04 (Do spalania niedopuszczalne będą płyty wiórowe i fornirowane oraz zawierające impregnaty, lakiery itp.)	65 045	116	łódzkie i mazowieckie	Zakłady zajmujące się obróbką drewna, producenci mebli, wyrobów tartacznych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie zestawienia z Ministerstwa Klimatu i Środowiska o wytworzonych odpadach w 2021 roku.

### **3. CEL PRACY I HIPOTEZY BADAWCZE**

#### **3.1. Cel pracy**

Celem podstawowym rozprawy doktorskiej jest pozyskanie wiedzy i określenie wytycznych do spalania mieszaniny paliw biomasowych o różnej kaloryczności w instalacjach energetycznych małej mocy przydatnych do zastosowania w przemyśle rolno - spożywczym, na przykładzie zakładu Polmos Żyrardów Sp. z o.o.

#### **3.2. Zakres badań**

W realizacji zamierzonego celu sformułowano następujące zadania badawcze:

1. Zdefiniowanie optymalnego strumienia mieszaniny biomasy energetycznej (pochodzenia roślinnego) w skład której wchodzić będzie paliwo podstawowe zrębka drewna i produkt uboczny / odpad z procesu produkcyjnego żywności.

Optymalny strumień mieszaniny biomasy energetycznej, w skład której wchodzi zrębki drzewne jako paliwo podstawowe oraz produkty uboczne z przemysłu rolno - spożywczego (np. wytloki, łupiny orzechów, łuski), powinien być tak dobrany, aby zapewniał wysoką wartość opałową, niską wilgotność oraz akceptowalny poziom emisji zanieczyszczeń i popiołu. Przykładowo, mieszanka składająca się ze zrębki drzewnej oraz produktu ubocznego z przemysłu rolno – spożywczego pozwala na osiągnięcie wartości opałowej mieszaniny biomasy energetycznej na poziomie odpowiednim do zastosowania w kotłach rusztowych i fluidalnych. Takie podejście gwarantują nie tylko efektywność energetyczną, ale też stabilność procesu spalania oraz ograniczenie problemów związanych z nadmierną zawartością wilgoci czy popiołu. Dodatkowo, wykorzystanie odpadów z przemysłu rolno - spożywczego przyczynia się do poprawy bilansu środowiskowego i gospodarki obiegu zamkniętego.

2. Uzyskanie optymalnej i dopasowanej do procesu produkcyjnego, stabilnej pracy kotła parowego oraz określonych parametrów termodynamicznych pary wodnej (ciśnienia i temperatury) podczas spalania biomasy energetycznej.

Aby zapewnić optymalną i stabilną pracę kotła parowego podczas spalania biomasy energetycznej, konieczne jest precyzyjne dopasowanie parametrów paliwa i procesu spalania do wymagań technologicznych. Kluczowym celem jest utrzymanie stałych warunków generacji pary wodnej o określonych parametrach termodynamicznych co ma bezpośredni wpływ na sprawność instalacji oraz bezpieczeństwo procesu. Osiągnięcie tego wymaga stosowania jednorodnej mieszaniny biomasy (np. zrębki drzewnej z dodatkiem odpadu organicznego), o kontrolowanej wilgotności i wartości opałowej. Równocześnie ważna jest automatyczna regulacja procesu spalania (sterowanie dopływem powietrza, temperaturą komory, podawaniem paliwa), co pozwala na utrzymanie stałej temperatury spalania, a tym samym – stabilnego wytwarzania pary. Odpowiednio dobrany skład mieszanki paliwowej oraz zaawansowane sterowanie kotłem umożliwiają zachowanie efektywności cieplnej oraz spełnienie wymagań środowiskowych.

3. Opracowanie sposobu magazynowania, mieszania i automatycznego podawania biomasy energetycznej do zasobnika kotła instalacji energetycznej.

Opracowanie skutecznego systemu magazynowania, mieszania i automatycznego podawania biomasy energetycznej do zasobnika kotła jest kluczowe dla zapewnienia ciągłości i stabilności procesu spalania. Biomasa, w zależności od rodzaju (np. zrębka drzewna, odpady roślinne, wyłoki), powinna być przechowywana w odpowiednio wentylowanych silosach lub magazynach zadaszonych, zabezpieczonych przed wilgocią i możliwością samozapłonu. Do uzyskania jednorodnej mieszaniny surowców stosuje się technologie mieszania, które zapewniają równomierne połączenie składników o różnych właściwościach fizycznych. Następnie biomasa transportowana jest do zasobnika buforowego kotła, skąd podawana jest automatycznie do komory spalania. Zastosowanie czujników poziomu, wilgotności i masy w systemie podawania pozwala na precyzyjne sterowanie dawkowaniem paliwa, co przekłada się na stabilne warunki pracy kotła oraz efektywne wykorzystanie energii zawartej w biomacie.

#### 4. Opracowanie sposobu zagospodarowania produktów spalania biomasy energetycznej w innych gałęziach przemysłu.

Opracowanie sposobu zagospodarowania produktów spalania biomasy energetycznej, takich jak popiół paleniskowy i popiół lotny, stanowi ważny element gospodarki cyrkularnej i zrównoważonego rozwoju. Produkty te, w zależności od składu chemicznego, mogą być wykorzystane w różnych gałęziach przemysłu. W rolnictwie, popioły z biomasy mogą służyć jako nawóz mineralny lub materiał do odkwaszania gleb, ze względu na obecność wapnia, potasu i fosforu. W budownictwie znajdują zastosowanie jako dodatek do cementu, betonu lub materiałów drogowych, poprawiając właściwości mechaniczne i trwałość tych materiałów. Możliwe jest również ich użycie jako materiał uszczelniający składowiska odpadów lub jako wypełniacz w produkcji prefabrykatów. Kluczowe jest jednak wcześniejsze przeprowadzenie analizy chemicznej popiołów, aby potwierdzić ich przydatność i bezpieczeństwo dla środowiska i ludzi.

### 3.3. Hipotezy badawcze

- H1: Wyeliminowanie paliw kopalnych z produkcji rolno-spożywczej i zastąpienie ich biomasa energetyczną, pozwala zmniejszyć emisję nadmiarowego CO<sub>2</sub> do atmosfery i zachować zrównoważony obieg węgla w przyrodzie,
- H2: Optymalny skład mieszaniny biomasy energetycznej (pochodzenia roślinnego) jest gwarantem stabilności parametrów termodynamicznych pary wodnej (ciśnienia i temperatury) do zasilania procesu technologicznego w przemyśle rolno – spożywczym na przykładzie Polmosu Żyrardów,
- H3: Zagospodarowywanie produktów ubocznych / odpadów z przemysłu rolno-spożywczego na cele energetyczne pozwala wytwarzać tanią energię do produkcji żywności,
- H4: Zagospodarowanie produktów spalania biomasy energetycznej w różnych gałęziach przemysłu zmniejsza negatywny wpływ przemysłu rolno-spożywczego na środowisko naturalne.

## 4. MATERIAŁ BADAWCZY I METODYKA BADAŃ

### 4.1. Rodzaj badań

W celu określenia przydatności wybranych rodzajów biomasy jako paliwa energetycznego, przeprowadzono kompleksowe badania laboratoryjne obejmujące kluczowe parametry determinujące efektywność oraz bezpieczeństwo ich wykorzystania w procesie spalania.

Określono następujące właściwości fizykochemiczne biomasy:

- wartość opałową – określającą ilość energii uzyskiwanej podczas pełnego spalania jednostki masy paliwa,
- wilgotność całkowitą – wpływającą na efektywność spalania i emisję zanieczyszczeń,
- zawartość popiołu – determinującą ilość pozostałości po spalaniu oraz potencjalne problemy eksploatacyjne w instalacji,
- wilgotność biomasy w dole zasypowym oraz na podłodze – pozwalającą na ocenę warunków przechowywania i transportu materiału w zakładzie.

Ponadto, dokonano oceny składu pierwiastkowego próbek biomasy, celem określenia ich wpływu zarówno na środowisko naturalne (np. emisje metali ciężkich), jak i na trwałość oraz eksploatację urządzeń technologicznych stosowanych w procesie spalania (np. korozja, osadzanie się popiołu).

Dodatkowo monitorowano wilgotność biomasy w trakcie podawania do komory paleniskowej kotła, aby weryfikować rzeczywiste warunki procesu i dostosowywać parametry pracy instalacji.

W analizie technicznej oraz elementarnej paliwa wyróżnia się trzy podstawowe stany reprezentatywnej próbki, które pozwalają na ujednoczenie i porównywalność wyników pomiarów:

- stan roboczy – odnosi się do paliwa w jego rzeczywistej formie, dostarczanego bezpośrednio do paleniska. W tym stanie materiał zawiera naturalną wilgotność i charakterystyczną dla procesu wielkość cząstek.

- stan analityczny – dotyczy próbki poddanej wstępnej obróbce laboratoryjnej, polegającej na podsuszeniu i rozdrobnieniu. Stan ten umożliwia precyzyjne i powtarzalne przeprowadzenie analiz chemicznych i fizycznych.
- stan suchy – definiowany jako próbka niemal całkowicie pozbawiona wilgoci (wilgotność bliska zeru). Stan ten służy do wyznaczenia parametrów paliwa w warunkach idealnych, eliminujących wpływ wilgoci na wyniki badań.

W celu przeliczenia parametrów paliwa pomiędzy wymienionymi stanami stosuje się odpowiednie współczynniki konwersji, które zostały przedstawione w tabeli 8.

**Tabela 8.** Współczynniki do przeliczania wartości parametrów paliw stałych.

Wartość parametru prezentująca	Współczynniki do przeliczania wartości parametrów ze stanu w kolumnie 1 na stan:		
	roboczy (r)	analityczny (a)	suchy (d)
Stan roboczy (r)	1	$\frac{100 - W^a}{100 - W_t^r}$	$\frac{100}{100 - W_t^r}$
Stan analityczny (a)	$\frac{100 - W_t^r}{100 - W^a}$	1	$\frac{100}{100 - W^a}$
Stan suchy (d)	$\frac{100 - W_t^r}{100}$	$\frac{100 - W^a}{100}$	1
$W^a$ – zawartość wilgoci w próbce analitycznej [%]; $W_t^r$ – zawartość wilgoci całkowitej [%]; A – zawartość popiołu [%]			

Źródło: Opracowanie własne na podstawie literatury (Chmielniak, 2013).

Wyniki analiz przeliczano i przedstawiano w stanie roboczym, odpowiadającym rzeczywistym warunkom, w jakich paliwo jest spalane w kotłach. Takie podejście umożliwia właściwą ocenę parametrów paliwa oraz optymalizację procesu spalania w warunkach eksploatacyjnych.

## 4.2. Materiał badawczy

Rodzaje biomasy badane pod względem zawartości popiołu, składu pierwiastkowego, wilgotności całkowitej i wartości opałowej:

- zrębka drzewna mieszana 1 i 2 – mieszanka drewna niepełnowartościowego (średniowymiarowe, małowymiarowe), drewna ze zrównoważonej gospodarki leśnej, które nie znalazło zastosowania w przetwórstwie i przemyśle drzewnym.  
Drewno pochodziło zarówno z drzew liściastych jak i iglastych, takich jak: olsza, czeremcha, akacja, brzoza, dąb, sosna, świerk,
- rdzenie kolb kukurydzy – stanowiące pozostałość rolniczą, resztki poźniwne po zbiorze kukurydzy na ziarno,
- pestki ze śliwek – odpad poprodukcyjny branży spożywczej,
- wywar pogorzelniczny – produkt uboczny powstający przy produkcji bioetanolu, gęsty odciek z pierwszego procesu fermentacji,
- Wysłodki buraka cukrowego – produkt uboczny powstający w procesie produkcji cukru.

Rodzaje biomasy badane pod względem wpływu na pracę kotła:

- zrębka drzewna mieszana – pochodząca z drewna niepełnowartościowego oraz z drewna, które nie znajduje zastosowania w przetwórstwie i przemyśle drzewnym.  
Drewno pochodziło zarówno z drzew liściastych jak i iglastych. Były to takie gatunki drzew, takie jak: olsza, czeremcha, akacja, brzoza, dąb, sosna, świerk. Drewno jest średniowymiarowe i małowymiarowe,
- rdzenie kolb kukurydzy – stanowiące pozostałość rolniczą, resztki poźniwne po zbiorze kukurydzy na ziarno,
- mieszanka rdzeni kolb kukurydzy w udziale 20% i zrębki drzewnej mieszanej w udziale 80% – rdzenie kolb kukurydzy będące pozostałością rolniczą oraz zrębka drzewna mieszana (drzewa liściaste i iglaste),
- mieszanka rdzeni kolb kukurydzy w udziale 50% i zrębki drzewnej mieszanej w udziale 50% – rdzenie kolb kukurydzy będące pozostałością rolniczą oraz zrębka drzewna mieszana (drzewa liściaste i iglaste).

- mieszanka rdzeni kolb kukurydzy w udziale 20% i zrębki drzewnej mieszanej w udziale 80% – rdzenie kolb kukurydzy będące pozostałością rolniczą oraz zrębka drzewna mieszana (drzewa liściaste i iglaste).

### 4.3. Metody badawcze

Zastosowano następujące metody analiz chemicznych:

- zawartość popiołu [ $A^r$ ] – oznaczenie metodą wagową, na podstawie normy PN-EN ISO 18122:2016-01,
- zawartość wilgoci całkowitej [ $W_t^r$ ] – masy wody obecnej w materiale badawczym, wyrażonej jako procent w stosunku do jego masy – metodą suszarkową, zgodnie z normą PN-EN ISO 18134-1:2015-11,
- ciepło spalania [ $Q_s^r$ ] - obliczono na podstawie wyników uzyskanych z analizy CHNS na podstawie wzoru Dulonga (Ferens, 2014),
- wartość opałowa [ $Q_i^r$ ] – obliczono w oparciu o wzory zawarte w normie PN-EN ISO 18125:2017-07,
- określenie wpływu biomasy na pracę kotła, na podstawie parametrów termodynamicznych kotła, takich jak: ciśnienie pary, przepływu pary i sprawności kotła,
- zawartość węgla [ $C^r$ ], wodoru [ $H^r$ ] – metodą wysokotemperaturowego spalania z detekcją IR, na podstawie normy PN-EN ISO 16948:2015-07,
- zawartość azotu ogólnego [ $N^d$ ] – metodą miareczkową (Kjeldahla), na podstawie normy PN-EN 13342:2002,
- zawartość siarki [ $S^r$ ] – metodą wysokotemperaturowego spalania z detekcją IR, na podstawie normy PN-EN ISO 16994:2016-10,
- zawartość chloru [ $Cl^r$ ] – metodą miareczkową, na podstawie akredytowanej procedury badawczej nr PB/FCH/89/A:27.02.2014.

Przygotowanie próbek żyta do badania:

Próbki zostały przygotowane do analizy chemicznej. Do kolb o pojemności 250 cm<sup>3</sup> odważono 1 g zmielonej gleby, następnie dodano katalizator (CuSO<sub>4</sub> + K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Do tak przygotowanych kolb odmierzone i dodano 10 cm<sup>3</sup> stężonego kwasu siarkowego (VI), po czym kolby umieszczono na piecu. Mineralizacja trwała około 45 minut i zachodziła w temperaturze 420°C.

Po zmineralizowaniu próbek azot oznaczoną metodą Kiejdahla na autoanalyzerze Foss. Otrzymane w doświadczeniu wyniki poddano analizie wariancji w układzie jednoczynnikowym a średnie pogrupowano w grupy jednorodne wg wyników testu Fishera przy P = 0,01. Obliczenia prowadzono w programie Staistica v. 13 PL

## **5. ANALIZA TECHNICZNA KOTŁA PAROWEGO I OKREŚLENIE JEGO POTRZEB ENERGETYCZNYCH GWARANTUJĄCYCH STABILNĄ JEGO PRACĘ**

Elektrociepłownia w Polmos Żyrardów Sp. z o.o. wykorzystuje na cele energetyczne biomasę pochodzenia roślinnego, charakteryzującą się specyficzną kalorycznością oraz wilgotnością paliwa. Proces spalania biomasy realizowany jest w ramach zaawansowanego układu współwytworzenia energii elektrycznej i ciepłej, wspieranego wysokosprawnym systemem odzysku ciepła ze spalin. Uzyskana energia stanowi kluczowe źródło zasilania technologii produkcji żywności oraz centralnego ogrzewania zakładu.

Wyniki analizy technicznej dotyczące właściwości paliwa oraz parametrów procesu spalania zawierają szczegółowe dane, które są bezpośrednio powiązane z efektywnością i stabilnością pracy układu energetycznego.

Ujawnienie tych informacji mogłoby prowadzić do naruszenia bezpieczeństwa energetycznego przedsiębiorstwa, a także ujawnienia szczegółów dotyczących wykorzystywanej technologii oraz strategii zarządzania energią.

Dane te stanowią istotny element know-how firmy, wpływający na konkurencyjność oraz bezpieczeństwo operacyjne elektrociepłowni. Ich ochrona przed nieuprawnionym dostępem jest niezbędna dla zachowania przewagi technologicznej oraz zapewnienia ciągłości i niezawodności procesów produkcyjnych.

W związku z powyższym, wyniki badań powinny zostać objęte klauzulą poufności i nie mogą być upubliczniane, aby zabezpieczyć interesy technologiczne, ekonomiczne oraz operacyjne Polmos Żyrardów Sp. z o.o.

## **6. WDROŻENIE WYNIKÓW BADAŃ W ZAKŁADZIE PRODUKCYJNYM POLMOS ŻYRARDÓW SP. Z O. O.**

Wyniki przeprowadzonych badań zawarte w tym rozdziale stanowią istotny element wiedzy technicznej i operacyjnej, kluczowy dla zapewnienia efektywności oraz stabilności procesu spalania biomasy w instalacjach przemysłowych. Analiza i przeprowadzone doświadczenia potwierdziły, że efektywność energetyczna procesu jest ściśle uzależniona od właściwości fizykochemicznych paliwa – w szczególności od jego wilgotności, jednorodności frakcji oraz poziomu zanieczyszczeń nieorganicznych. Parametry te bezpośrednio wpływają na wydajność spalania, zużycie paliwa, emisję zanieczyszczeń oraz trwałość urządzeń.

Wyniki badań ujawniają również szczegóły dotyczące zastosowanych rozwiązań technologicznych, takich jak zaawansowane systemy podawania i mieszania paliwa, które znacząco poprawiły stabilność procesu spalania. Informacje te mają charakter know-how i są wynikiem specjalistycznych prac rozwojowych oraz dostosowania technologii do zmiennych właściwości surowca.

Doskonalenie procesu wymagało integrację działań w zakresie precyzyjnego przygotowania i mieszania biomasy, kontroli wilgotności, ograniczenia zanieczyszczeń oraz zaawansowanego sterowania spalaniem.

Ujawnienie wyników badań mogłoby doprowadzić do ujawnienia strategii technicznej zakładu, parametrów operacyjnych kotłów oraz specyfiki zarządzania jakością surowca.

Z uwagi na powyższe, informacje zawarte w badaniach prowadzonych w zakładzie Polmos Żyrardów Sp. z o.o. muszą być traktowane jako poufne. Ich upublicznienie mogłoby naruszyć interesy handlowe i technologiczne przedsiębiorstwa, a także osłabić jego pozycję konkurencyjną.

Dane te odzwierciedlają nie tylko aktualny stan technologiczny instalacji, ale również kierunki jej dalszego rozwoju – co nadaje im strategiczny charakter.

## **7. WPLYW POPIOŁÓW ZE SPALANIA BIOMASY NA WŁAŚCIWOŚCI GLEBY I PLONOWANIE ŻYTA**

W skali globalnej zastosowanie biomasy do celów energetycznych staje się coraz bardziej powszechne ze względu na niezmiernie istotne zalety środowiskowe tej technologii, czyli redukcję emisji gazów cieplarnianych i ograniczenie wykorzystania nieodnawialnych nośników energii. Spalaniu biomasy jednak nieuchronnie towarzyszy powstawanie stałych odpadów paleniskowych (popiołów), których już obecnie w skali świata powstaje rocznie wg różnych danych od 480 do 500 mln Mg. Trzeba wyraźnie wspomnieć o tym, że polityka energetyczna Wspólnoty Europejskiej zakłada poszerzenie wykorzystania energetycznego biomasy, wskutek tego ilość generowanego w instalacjach energetycznych popiołów będzie dynamicznie rosła (Waste Framework Directive (2008/98/EC). Vassilev i in. (2013a) przedstawili prognozę, wg której w 2050 roku 33-50% produkcji energii pierwotnej netto będzie pochodziło ze spalania biomasy, czyli przy założeniu, że popiół powstaje średnio w ilości 7% spalanej biomasy wolumen generowanych popiołów biomasowych przewyższy ilość obecnie powstających popiołów węglowych.

Zhai i in. (2021) szacują natomiast, że na całym świecie do produkcji energii użytecznej zużywa się około 3 Gt rok<sup>-1</sup> biomasy (mniej niż poprzednie szacunki wynoszące 7 Gt rok<sup>-1</sup>), a większość (>90%) jest wykorzystywana jako paliwo stałe, generując 170 Mt popiołów rocznie. Jednak zużycie biomasy może wzrosnąć nawet do około 8 Gt rok<sup>-1</sup>, wskutek tego powstanie wtedy ok. 1000 Mt popiołu rocznie, jeśli wykorzystana zostanie cała obecnie dostępna biomasa. W wyniku spalania główną frakcją odpadów stałych jest popiół lotny o składzie chemicznym zdominowany zazwyczaj przez dwa z trzech tlenków: SiO<sub>2</sub>, CaO, K<sub>2</sub>O, które zazwyczaj tworzą >60% masy popiołów.

### **7.1. Ocena możliwości wykorzystania popiołów ze spalania różnego rodzaju biomasy do zagospodarowania na powierzchni ziemi**

Odpad 10 01 99, który jest, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r., dopuszczony do odzysku w procesie R10 w punkcie IV: Odpady mineralne, jako odpad pochodzący ze spalania biomasy w rozumieniu przepisów wydanych na podstawie art. 146 ust. 3 ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska

i musi spełnić warunki w procesie odzysku: Obróbka na powierzchni ziemi przynosząca korzyści dla rolnictwa lub poprawę stanu środowiska.

Odpady ze spalania biomasy o kodzie 10 01 99 mogą być stosowane do obróbki na powierzchni ziemi przynoszącej korzyści dla rolnictwa lub poprawę stanu środowiska pod warunkiem, że są spełnione wymagania dotyczące dopuszczalnych wartości zanieczyszczeń dla nawozów określone w przepisach wydanych na podstawie Ustawy z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz. U. Nr 147, poz. 1033).

Obowiązujące w tym zakresie rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. Nr 119, poz. 765) określa dopuszczalną wartość zanieczyszczeń w nawozach mineralnych i środkach wspomagających uprawę roślin pochodzenia mineralnego w zakresie zawartości arsenu, kadmu, ołowiu i rtęci.

W tabeli 20 zestawiono wyniki badań stężeń badanych metali ciężkich w badanych odpadach o kodzie 10 01 99, powstałych w wyniku spalania różnych rodzajów biomasy z zawartościami dopuszczalnymi przy obróbce na powierzchni ziemi przynoszącej korzyści dla rolnictwa lub poprawę stanu środowiska. Natomiast w tabeli 21 zamieszczono wyniki pozostałych (poza metalami ciężkimi) parametrów badanych popiołów ze spalania biomasy, ważnych przy rolniczym wykorzystaniu.

Wyniki badań zawartości metali ciężkich, przedstawione w tabeli 20 wykazały, że:

- stężenie arsenu w badanych odpadach ze spalania biomasy wahało się w granicach od <5,00 do 848 mg/kg s.m. Najniższe stężenie arsenu <5,00 mg/kg s.m. stwierdzono w popiele ze spalania zrębek drzewnych leśnych, pestek ze śliwek, rdzeni kolb kukurydzy i zrębek drzewnych z osadem wapniowym, a najwyższe w przypadku spalania wysłdków z buraka cukrowego, było ono ok 20 krotnie wyższe od dopuszczalnych wartości,
- stężenie kadmu w badanych odpadach ze spalania biomasy wahało się w granicach od 0,050 do 4,658 mg/kg s.m. Najniższe stężenie kadmu <0,050 mg/kg s.m. stwierdzono w odpadach ze spalania zrębek drzewnych, pestek ze śliwek, wysłdków z buraka cukrowego i rdzeni kolb kukurydzy, a najwyższe 4,658 mg/kg s.m. w przypadku spalania zrębek drzewnych z dodatkiem osadu wapniowego, jednak było ono ok. 10 krotnie niższe od dopuszczalnych wartości,

**Tabela 9.** Porównanie zawartości metali ciężkich w badanych popiołach ze spalania różnych rodzajów biomasy w kotłowni z najwyższymi stężeniami dopuszczalnymi przy rolniczym wykorzystaniu.

Parametry	Jednostki	Wartości parametrów stwierdzone w badanym popiele ze spalania biomasy							Najwyższe dopuszczalne przy rolniczym wykorzystaniu (Dz.U. Nr 119, poz. 765)
		zrębka drzewna	zrębka drzewna leśna	wywar pogorzelnicy	pestki ze śliwek	wysłodki z buraka cukrowego	rdzenie kolb kukurydzy	zrębka drzewna i osad wapniowy	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
<b>Arsen / As</b>	mg/kg s.m.	8,53	5,00	189	<5,00	848	<5,00	<5,00	50
<b>Kadm / Cd</b>	mg/kg s.m.	0,050	0,0710	0,937	<0,050	<0,050	<0,050	4,658	50
<b>Olów / Pb</b>	mg/kg s.m.	1,00	5,61	26,5	<1,00	<1,00	2,73	16,58	140
<b>Rtęć / Hg</b>	mg/kg s.m.	0,10	<0,05	0,10	<0,05	0,06000	<0,05	<0,05	2

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

- stężenie ołowiu w badanych odpadach ze spalania biomasy wahało się od <1,00 do 16,58 mg/kg s.m. Najniższe stężenie ołowiu <1,00 mg/kg s.m. stwierdzono ze spalania zrębek drzewnych, pestek ze śliwek i wysłodków z buraka cukrowego, a najwyższe 16,58 mg/kg s.m. w przypadku spalania zrębek drzewnych z dodatkiem osadu wapniowego, jednak było ono ok. 8 krotnie niższe od dopuszczalnych wartości,
- stężenie rtęci w badanych popiołach ze spalania biomasy wahało się w granicach od <0,005 do 0,10 mg/kg s.m. Najniższe stężenie rtęci <0,005 mg/kg s.m. stwierdzono w popiele ze spalania zrębek drzewnych, a najwyższe 0,10 mg/kg s.m. w przypadku spalania wywaru pogorzelniczego, było ono 20 krotnie niższe od możliwych wartości.

Podsumowując, badania zawartości metali ciężkich wykazały, że wszystkie badane popioły ze spalania biomasy spełniają prawne wymagania dotyczące zawartości kadmu, ołowiu i rtęci. Wymagań prawnych w zakresie zawartości arsenu nie spełniają popioły ze spalania wywaru pogorzelniczego i wysłodków z buraka cukrowego.

Wyniki jakości popiołów ze spalania różnych rodzajów biomasy, zamieszczone w tabeli 21, wskazują, że charakteryzują się one szeregiem korzystnych wskaźników, ważnych przy rolniczym wykorzystaniu:

- niską zawartością substancji organicznych od < 0,5 do 2,9%, co świadczy, że badane popioły nie są podatne na zagniwanie, emisję odorów i takich gazów jak NH<sub>3</sub> i H<sub>2</sub>S. Tym samym nie stanowią zagrożenia dla środowiska lub zdrowia ludzi i sposób ich zagospodarowania nie powinien wywołać protestów okolicznych mieszkańców;
- obecnością cennych pierwiastków, które wzbogacą grunty w ważne makroelementy:
  - azotu ogólnego w stężeniu od 0,160 (zrębki drzewne z osadem wapniowym) do 0,810 g/kg (zrębki drzewne leśne),
  - azotu w formie amonowej w stężeniu 0,05 (we wszystkich badanych popiołach),
  - fosforu ogólnego jako P od <0,50 (wywar pogorzelniczny i pestki ze śliwek) do 9180 g/kg (zrębki drzewne leśne),
  - fosforu przyswajalnego jako P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> od 1600 (pestki ze śliwek) do 28950 g/kg (wysłodki z buraka cukrowego),
  - potasu od <100 (pestki ze śliwek) do 189690 g/kg (rdzenie kolb kukurydzy),
  - magnezu od 0,801 (pestki ze śliwek) do 40873 g/kg (wysłodki z buraka),
  - wapnia jako Ca od 4568 (wysłodki z buraka cukrowego) do 250521 g/kg (wywar pogorzelniczny),
  - wapnia jako CaO od 0,678 (pestki ze śliwek) do 9450 g/kg (wywar pogorzelniczny).

**Tabela 10.** Porównanie wartości wybranych parametrów jakości badanych popiołów ze spalania różnych rodzajów biomasy w kotłowni.

Parametry	Jednostki	Wartości parametrów popiołów ze spalania biomasy						
		zrębki drzewne	zrębki drzewne leśne	wywar pogorzelnicy	pestki ze śliwek	wysłodki z buraka cukrowego	rdzenie kolb kukurydzy	zrębki drzewne i osad wapniowy
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
Zawartość suchej masy	%	>99,0	>99,0	100,0	>99,0	>99,0	>99,0	100
Ogólny węgiel organiczny (C)	% s.m.	<0,5	<0,50	0,63	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Straty przy prażeniu (LOI)	% s.m.	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Azot ogólny Kjeldahla	g/kg s.m.	0,56	0,54	0,072	0,60	0,40	5,07	0,0160
Azot amonowy / N-NH <sub>4</sub>	g/kg s.m.	0,05	0,05	<0,005	0,05	0,05	0,85	<0,005
Fosfor ogólny / P	g/kg s.m.	0,733	2,040	109398	0,678	7,582	13,500	5853
Fosfor / P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	mg/kg s.m.	2,33	1,68	250521	0,35	6,32	5,52	13400
Wapń / Ca	g/kg s.m.	30,700	22,800	9450	4,840	4,457	7,860	137900
Wapń / CaO	mg/kg s.m.	42,9	32,0	19,5	32,0	>20,0	11,0	2,710
Magnez / Mg	g/kg s.m.	1,810	2,330	47750	0,801	9,226	>25,000	6237
Sód / Na	g/kg s.m.	<0,100	<0,100	63000	<0,100	11,600	<0,100	1139
Potas / K	g/kg s.m.	16120	>10,000	233990	7,330	>10,000	>10,000	18342,5
Chlorki / Cl	g/kg s.m.	0,151	0,646	37900	0,273	0,5127	>12,000	2359
Siarczany rozpuszczalne w wodzie	g/kg s.m.	13,200	1,820	23100	0,222	24,590	3,100	1221

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Nie określano w badanych popiołach ze spalania biomasy obecności żywych jaj pasożytów jelitowych, ani bakterii z rodzaju Salmonella, ponieważ w cyklu produkcji tego odpadu nie ma możliwości skażenia tymi zanieczyszczeniami biologicznymi.

W tabeli 23 zestawiono dane określające stopień wymywania metali ciężkich z popiołów ze spalania różnego rodzaju biomasy, a w tabeli 24 dane oceniające możliwość skażenia wody czy ziemi metalami ciężkimi. biorąc pod uwagę wymagania określone, jako najwyższe dopuszczalne przy wprowadzaniu do wód lub ziemi w Rozporządzeniu MGM i ŻE z dnia 12 lipca 2019 r. (Dz.U. 2019 r., poz. 1311).

Stopień wymywania metali ciężkich z poszczególnych badanych popiołów jest różny, zależnie od rodzaju metalu i pochodzenia popiołu (tabela 22).

Stopień wymycia waha się w przypadku:

- chromu od 0 (zrębki drzewne) do 85,3 % (zrębki drzewne i osad wapniowy),
- kadmu od 0,37 (wywar po gorzelnicy) do 5 % (pestki ze śliwek),
- miedzi od 0,08 (zrębki drzewne i osad wapniowy) do 5 % (zrębki drzewne),
- niklu od 0,07 (zrębki drzewne leśne) do 16,10% (pestki ze śliwek),
- ołowiu od 0,18 (zrębki drzewne leśne) do 6,63% (zrębki drzewne i osad wapniowy),
- cynku od 0,01 (zrębki drzewne leśne) do 3,97% (pestki ze śliwek),
- rtęci od 0 (zrębki drzewne) do 10,0% (zrębki drzewne leśne, pestki ze śliwek. rdzenie kolb kukurydzy i zrębki drzewne z osadem wapniowym),
- arsenu od 0,009 (wysłodki z buraka cukrowego) do 69,0% (wywar pogorzelnicy).

Niski poziom metali ciężkich w większości badanych popiołów ze spalania różnego rodzaju biomasy, a zwłaszcza znikomy stopień wymywalności tych metali do wody wskazuje, że zagrożenie skażenia wody czy ziemi nie nastąpi, biorąc pod uwagę wymagania określone, jako najwyższe dopuszczalne przy wprowadzaniu do wód lub ziemi.

**Tabela 11.** Stopień wymywania metali ciężkich z popiołów powstałych w procesie spalania różnego rodzaju biomasy.

Parametry	Rodzaj oznaczenia	Wartości parametrów						
		zrębki drzewne	zrębki drzewne leśne	wywar po-gorzelniczny	pestki ze śliwek	wysłodki z buraka cukrowego	rdzenie kolb kukurydzy	zrębki drzewne i osad wapniowy
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
<b>Chrom / Cr</b>	w popiele, mg/kg	35,3	0,30	9,71	<0,30	3,659	15,7	38,68
	w wyciągu wodnym popiołu, mg/kg	0,0120	0,325	4,74	<0,010	1,7	0,661	0,33
	<b>stopień wymycia, %</b>	<b>0,03</b>	<b>~0</b>	<b>48,8</b>	<b>3,33</b>	<b>46,5</b>	<b>4,2</b>	<b>85,3</b>
<b>Kadm / Cd</b>	w popiele, mg/kg	0,050	0,0710	0,937	<0,050	<0,050	<0,50	4,658
	w wyciągu wodnym popiołu, mg/kg	0,00243	0,000680	0,00342	0,00250	<0,00050	0,00114	0,0015
	<b>stopień wymycia, %</b>	<b>4,86</b>	<b>0,96</b>	<b>0,37</b>	<b>5,00</b>	<b>1,00</b>	<b>2,28</b>	<b>0,03</b>
<b>Miedź / Cu</b>	w popiele, mg/kg	0,40	68,8	63,9	<0,40	6,666	46,2	37,09
	w wyciągu wodnym popiołu, mg/kg	0,0750	0,0320	0,750	0,00250	0,064	0,0920	0,029
	<b>stopień wymycia, %</b>	<b>18,75</b>	<b>4,65</b>	<b>1,17</b>	<b>0,63</b>	<b>0,96</b>	<b>0,20</b>	<b>0,08</b>
<b>Nikiel / Ni</b>	w popiele, mg/kg	1,00	13,8	36,4	0,539	1,246	9,58	7,409
	w wyciągu wodnym popiołu, mg/kg	0,0228	0,010	0,0630	0,0870	<0,010	0,0520	<0,010
	<b>stopień wymycia, %</b>	<b>2,28</b>	<b>0,07</b>	<b>0,17</b>	<b>16,10</b>	<b>0,80</b>	<b>0,54</b>	<b>0,14</b>
<b>Ółów / Pb</b>	w popiele, mg/kg	1,00	5,61	26,5	<1,00	<1,00	2,73	16,58
	w wyciągu wodnym popiołu, mg/kg	0,0303	0,010	0,0720	0,0290	<0,010	<0,010	1,1
	<b>stopień wymycia, %</b>	<b>3,03</b>	<b>0,18</b>	<b>0,27</b>	<b>2,90</b>	<b>1,00</b>	<b>0,37</b>	<b>6,63</b>

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
<b>Cynk / Zn</b>	w popiele, mg/kg	37,6	807	4440	2,52	80,71	535	566,0
	w wyciągu wodnym popiołu, mg/kg	1,25	0,10	13,0	<0,10	<0,10	0,135	8,6
	<b>stopień wymycia, %</b>	<b>3,32</b>	<b>0,01</b>	<b>0,29</b>	<b>3,97</b>	<b>0,12</b>	<b>0,03</b>	<b>1,52</b>
<b>Rtęć / Hg</b>	w popiele, mg/kg	0,10	<0,05	0,10	<0,05	0,06000	<0,05	<0,05
	w wyciągu wodnym popiołu, mg/kg	0,005	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	<b>stopień wymycia, %</b>	<b>0</b>	<b>10,00</b>	<b>5,0</b>	<b>10,00</b>	<b>8,33</b>	<b>10,0</b>	<b>10,0</b>
<b>Arsen / As</b>	w popiele, mg/kg	8,53	5,00	274	<5,00	848,2	<5,00	<5,00
	w wyciągu wodnym popiołu, mg/kg	<0,010	0,0180	189	<0,0100	0,075	0,368	0,075
	<b>stopień wymycia, %</b>	<b>0,12</b>	<b>0,36</b>	<b>69,0</b>	<b>0,20</b>	<b>0,009</b>	<b>7,36</b>	<b>1,5</b>
<b>Sód / Na</b>	w popiele, mg/kg	<100	451	63000	<100	11600	635	1139
	w wyciągu wodnym popiołu, mg/kg	49,7	92,3	22300	<5,00	790	475	140
	<b>stopień wymycia, %</b>	<b>49,7</b>	<b>20,5</b>	<b>35,4</b>	<b>5,0</b>	<b>6,81</b>	<b>74,8</b>	<b>12,3</b>
<b>Potas / K</b>	w popiele, mg/kg	1823	53022	233990	7330	28790	89690	18343
	w wyciągu wodnym popiołu, mg/kg	729	5796	35806	421	12283	61524	450
	<b>stopień wymycia, %</b>	<b>40,0</b>	<b>10,9</b>	<b>15,3</b>	<b>5,7</b>	<b>42,7</b>	<b>68,6</b>	<b>24,5</b>
<b>Chlorki / Cl</b>	w popiele, mg/kg	151	493	37900	273	512,7	7510	2359
	w wyciągu wodnym popiołu, mg/kg	<20	42	21000	62	300	2900	1500
	<b>stopień wymycia, %</b>	<b>13,2</b>	<b>8,5</b>	<b>55,4</b>	<b>22,7</b>	<b>58,5</b>	<b>38,6</b>	<b>63,6</b>
<b>Siarczany / SO<sub>4</sub></b>	w popiele, mg/kg	13200	3110	23100	222	24590	2820	13000
	w wyciągu wodnym popiołu, mg/kg	6400	730	520	150	13000	1500	1221
	<b>stopień wymycia, %</b>	<b>48,5</b>	<b>23,5</b>	<b>2,25</b>	<b>67,6</b>	<b>52,9</b>	<b>53,2</b>	<b>9,4</b>

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

**Tabela 12.** Porównanie stężeń metali ciężkich w wyciągu wodnego z badanych popiołów ze spalania biomasy z najwyższymi stężeniami dopuszczalnymi przy wprowadzaniu do wód lub ziemi.

Parametry	Jednostki	Wartości parametrów stwierdzone w wyciągu wodnym z badanych odpadów ze spalania biomasy							Najwyższe dopuszczalne przy wprowadzaniu do wód lub ziemi (Dz.U. 2019, poz. 1311)
		zrębki drzewne	zrębki drzewne leśne	wywar pogorzelnicy	pestki ze śliwek	wysłodki z buraka cukrowego	rdzenie kolb kukurydzy	zrębki drzewne i osad wapniowy	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
<b>Chrom / Cr</b>	mg /dm <sup>3</sup>	0,00120	0,0325	0,74	<0,0010	0,17	0,0661	0,33	0,5
<b>Kadm / Cd</b>	mg /dm <sup>3</sup>	0,000243	0,000068	0,000342	0,00025	<0,00005	0,000114	0,00015	0,4 (śr. Dobowa) i 0,2 (śr. Miesięczna)
<b>Miedź / Cu</b>	mg /dm <sup>3</sup>	0,00750	0,0032	0,0750	0,00025	0,0064	0,0092	0,0029	0,5
<b>Nikiel / Ni</b>	mg /dm <sup>3</sup>	0,00228	0,001	0,0063	0,008	<0,001	0,0052	<0,001	0,5
<b>Olów / Pb</b>	mg /dm <sup>3</sup>	0,00303	0,001	0,0072	0,0029	<0,001	<0,001	0,11	0,5
<b>Cynk / Zn</b>	mg /dm <sup>3</sup>	0,125	0,10	1,30	<0,010	<0,010	0,0135	8,6	2,0
<b>Rtęć / Hg</b>	mg /dm <sup>3</sup>	0,0005	0,0005	<0,0005	0,00025	0,0005	0,0005	<0,0005	0,06 (śr. Dobowa) i 0,03 (śr. Miesięczna)
<b>Arsen / As</b>	mg /dm <sup>3</sup>	<0,001	0,0018	18,9	<0,0010	0,0075	0,0368	0,0075	0,15

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Potwierdzają to stwierdzenie dane, zestawione w tabeli 23, stanowiące porównanie zawartości metali ciężkich w wyciągu wodnym z badanych popiołów z najwyższymi dopuszczalnymi stężeniami przy wprowadzaniu do wód lub ziemi określonymi w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. (Dz.U. 2019 r., poz. 1311).

Zamieszczone w tabeli 23 wskazują, że spośród badanych wyciągów wodnych z popiołów ze spalania różnych rodzajów biomasy:

- spełniają wymagania wyciągi wodne popiołów ze zrębek drzewnych, zrębek drzewnych leśnych, pestek ze śliwek, wysłodków z buraka cukrowego i rdzeni kolb kukurydzy,
- nie spełniają wymagań wyciągi wodne popiołów z wywaru pogorzelniczego (w zakresie stężenia chromu i arsenu) oraz ze zrębek drzewnych z osadem wapniowym (w zakresie stężenia cynku).

Dane porównawcze, przedstawione w tabeli 21 wskazują również, że dodatek osadu wapniowego do zrębek drzewnych:

- nie zmienia jakości popiołu uzyskanego po spaleniu takiej biomasy w zakresie zawartości: suchej masy, ogólnego węgla organicznego, substancji organicznych (strat przy prażeniu) i azotu amonowego;
- powoduje mniejszą niż ze spalania samych zrębek zawartość: azotu ogólnego Kjeldahla (o 0,71%), wapnia w postaci CaO (o 36,8%), siarczanów rozpuszczalnych w wodzie (o 90,8%) i arsenu (o 41,4%);
- powoduje wyższą niż ze spalania samych zrębek, zawartość: fosforu ogólnego (o 87,5%) i fosforu jako P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (o 20,1%), wapnia jako Ca (o 77,7%), magnezu (o 71,0%), sodu (o 91,2%), potasu (o 84,3%), chlorków (o 93,6%), frakcji ziarnowej < 0,063 mm (o 54,5%) oraz z metali ciężkich chromu (o 8,7%), kadmu (o 98,9%), miedzi (o 98,9) i niklu (o 86,5%), ołowiu (o 94,0%), cynku (o 93,4%) i rtęci (o 90,0 %).

W odpadach ze spalania biomasy znajdują się składniki odżywcze pochodzące z biomasy, dlatego logiczne jest ich wykorzystanie w rolnictwie – czyli „zawracanie” ich do ziemi, gdzie wyrosła biomasa. Pels i Sarabèr (2011) potwierdzają, że prawie wszystkie składniki odżywcze, są skoncentrowane w popiołach.

Wśród zalet stosowania popiołów ze spalania biomasy do celów rolniczych Vassilev (2013b) wymienia:

- poprawę równowagi w glebie poprzez dodatek składników odżywczych i niezbędnych składników obecnych w popiołach ze spalania biomasy – (C, O, H, Ca, K, czasami N, S, Mg, P, Cl, Na, Mn, Zn, Fe, B, Cu, Mo, inne),
- zapewnienie alkalicznego pH, które powoduje:
  - wzrost wartości pH, zasolenia (przewodnictwa elektrycznego), kationów zasadowych, potencjału neutralizacji kwasów oraz wietrzenia,
  - ograniczenie ługowania niebezpiecznych pierwiastków z gleby,
  - wzrost aktywności biologicznej i poprawę środowiska dla niektórych mikroorganizmów,
  - poprawę struktury gleby, jej napowietrzania i zdolności zatrzymywania wody.

Wśród ważnych składników odżywczych, które mogą występować w popiołach z biomasy, jest siarka (Pels i Sarabèr 2011).

Znaczne zawartości manganu, cynku i miedzi występujące w popiołach ze spalania biomasy mogą być przyczyną ograniczenia ich wykorzystania, jako źródła tych pierwiastków dla gleb (Ciesielczuk i in. 2011).

Badania zespołu Cruz i in. (2017) wskazały, że analizowane przez nich popioły ze spalania biomasy mogą być stosowane jako czynnik poprawiający jakość gleby, jednak pod warunkiem niskiej zawartości chromu.

Badania Diatty i Kowalskiego (2017) potwierdziły korzystne oddziaływanie popiołów ze spalania biomasy na poprawę buforowości gleby.

Badania Uliasz-Bocheńczyk i in. (2016a) wykazały, że popioły ze spalania biomasy mogą modyfikować właściwości fizyczne gleb, mogą również stanowić źródło niezbędnych dla roślin składników pokarmowych. Jednak ze względu na silnie alkaliczny charakter niektórych popiołów (pH około 12) powinny być stosowane na glebach kwaśnych (Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016a).

Bezpośrednie stosowanie popiołów powoduje, że potas jest łatwo ługowany i natychmiast dostępny dla roślin. Z kolei fosfor jest często w nierozpuszczalnej postaci i wymaga długiego czasu (do 20 lat), zanim będzie w pełni dostępny dla roślin, co powoduje, że ich wykorzystanie jest szczególnie atrakcyjne w leśnictwie (Kowalkowski i Olejarski 2013; Pels i Sarabèr 2011).

Najbardziej odpowiednie do wykorzystania do poprawy jakości gleb są popioły z biomasy zawierające duże ilości potasu i fosforu. Popioły z biomasy zawierające głównie wapń i magnez mogą być stosowane jako środek poprawiający jakość gleby w celu zrównoważenia pH (Pels i Sarabèr 2011).

Meller i Bilenda (2013) prowadzili badania dotyczące wykorzystania popiołów ze spalania biomasy do nawożenia kukurydzy zwyczajnej uprawianej na cele energetyczne. Autorzy stwierdzili, 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. Autorzy odnotowali również wzrost zawartości K, Ca oraz Na w ziarnie kukurydzy w porównaniu z próbką kontrolną. Stwierdzono też, że stężenie Mn, Zn oraz Cu w zielonej masie kukurydzy było wyższe dla większych ilości zaaplikowanych materiałów pylistych.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10 (Dz.U. 2015 poz. 132) określa także warunki stosowania produktów ubocznych i gleb, na których mają być stosowane m.in.:

- odpady ze spalania biomasy mogą być stosowane poza okresem wzrostu i rozwoju roślin przeznaczonych do bezpośredniego spożycia przez ludzi (czas od siewu albo sadzenia do zbioru) – przy czym posiadane są wyniki badań potwierdzających ich jakość i jakość gleb, na których mają być stosowane.
- wyniki badań odpadów ze spalania biomasy muszą potwierdzać, że są spełnione wymagania dotyczące dopuszczalnych wartości zanieczyszczeń dla nawozów określone w przepisach wydanych na podstawie Ustawy z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz.U. 2007, nr 147, poz. 1033),
- odpady ze spalania biomasy należy rozproszyc równomiernie na powierzchni gleby do głębokości 30 cm i przykryć glebą lub z nią wymieszać przy pomocy narzędzi uprawowych,
- dopuszczalna dawka odpadów ze spalania biomasy musi być ustalona z uwzględnieniem ich jakości, zasobności gleby, sposobu jej użytkowania oraz zapotrzebowania roślin na składniki pokarmowe, a także zasad dobrej praktyki rolniczej,

- odpady ze spalania biomasy winny być stosowane w taki sposób i w takiej ilości, aby ich stosowanie nie spowodowało pogorszenia jakości gleby, ziemi oraz wód powierzchniowych i podziemnych nawet przy długotrwałym stosowaniu, w szczególności nie szkodziło środowisku w rozumieniu przepisów Ustawy z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie,
- w przypadku przyzmożenia odpadów ze spalania biomasy należy wybrać miejsce utwardzone i nieprzepuszczalne, pozostawiając na dłuższy czas nawóz w przyzmożach powinno się okryć je materiałem wodoszczelnym.

### **Omówienie badań:**

Po zbadaniu jakości popiołów paleniskowych powstających ze spalania w kotłowni biomasy energetycznej oraz po przeprowadzeniu analizy w zakresie ich wykorzystania można stwierdzić, że:

- Jakość badanych rodzajów biomasy spalanej w kotłowni nie odbiega w większości przypadków swym składem w istotnym stopniu od typowych parametrów charakterystycznych dla biomasy i świadczy o spodziewanej wysokiej efektywności ich spalania,
- Wszystkie popioły ze spalania badanej biomasy w kotłowni spełniają warunki ustawy z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. z 2022 r. poz. 699) umożliwiające zakwalifikowanie ich, jako produkt uboczny,
- Prawne wymagania, dotyczące zawartości metali ciężkich (kadmu, ołowiu, rtęci i arsenu), określone w Rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. Nr 119, poz. 765), spełniają wszystkie badane popioły ze spalania biomasy w zakresie zawartości kadmu, ołowiu i rtęci,
- Popioły ze spalania wywaru pogorzelniczego i wysłodków z buraka cukrowego nie spełniają tych wymagań w zakresie zawartości arsenu i ich zastosowanie do nawożenia gleb, jako środka poprawiającego właściwości gleby lub do rekultywacji gruntów, jest możliwe po aplikacji odpowiednio mniejszych dawek,
- Popioły ze spalania różnych rodzajów biomasy charakteryzują się szeregiem, korzystnych parametrów przy rolniczym wykorzystaniu, w tym obecności cennych pierwiastków, które wzbogacą grunty w ważne makroelementy, takich jak: azot, fosfor, potas, magnez i wapń,

- Porównanie zawartości metali ciężkich w wyciągu wodnym z badanych popiołów z najwyższymi dopuszczalnymi stężeniami przy wprowadzaniu do wód lub ziemi określonymi w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. (Dz.U. 2019 r., poz. 1311) wskazuje, że spełniają te wymagania popioły ze zrębek drzewnych, zrębek drzewnych leśnych, pestek ze śliwek, wysłodków z buraka cukrowego i rdzeni kolb kukurydzy. Nie spełniają tych wymagań popioły ze spalania wywaru pogorzelniczego (w zakresie stężenia chromu i arsenu) oraz ze zrębek drzewnych z osadem wapniowym (w zakresie stężenia cynku). Ich aplikacja do nawożenia gleb jest możliwa przy odpowiednio mniejszych dawkach.

## 7.2. Badania wazonowe z wykorzystaniem popiołu – przygotowanie gleby

Badania miały charakter wielowymiarowy i były prowadzone na przestrzeni kilku sezonów wegetacyjnych roślin. Procesowi badawczemu zostały poddane dwie rośliny burak ćwikłowy i żyto uprawianymi w płodozmianie w warunkach doświadczenia wazonowego i ciągłego nawożenia popiołem.

Na potrzeby niniejszej rozprawy zostały omówione wyniki badań z uprawy żyta jako surowca dla przemysłu rolno – spożywczego Polmos Żyrardów Sp. z o. o. pokazując przenikanie się energetyki i technologii procesowej w wymiarze gospodarki obiegu zamkniętego dla procesu produkcji spirytusu.

W doświadczeniu zostały wykorzystane 3 rodzaje popiołów, którymi były:

- popiół ze spalania biomasy - rdzeni kolb kukurydzy,
- popiół ze spalania biomasy - zrębek drewna,
- popiół ze spalania biomasy spalonej w obecności wapna defekacyjnego.

Wykorzystując dostępną ilość popiołów, uwzględniając literaturę, wielkość donic, w porozumieniu z zleceniodawcą skonstruowano eksperyment o następujących obiektach:

1. Kontrola: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP
2. Kukurydza 8: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 8 g popiół z Kukurydzy
3. Kukurydza 16: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 16 g popiół z Kukurydzy
4. Kukurydza 32: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 32 g popiół z Kukurydzy
5. Zrębka 8: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 8 g popiołu z Zrębki

6. Zrębka 16: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 16 g popiołu z Zrębki
7. Zrębka 32: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 32 g popiołu z Zrębki
8. Wapno 8: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 8 g popiołu z biomasy spalonej w obecności wapna
9. Wapno 16: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 16g popiołu z biomasy spalonej w obecności wapna
10. Wapno 32: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 32g popiołu z biomasy spalonej w obecności wapna
11. Mix 8: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 8 g popiołu wymieszanego w proporcji: 25% kukurydzy i 75% zrębka.
12. Mix 16: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 16 g popiołu wymieszanego w proporcji: 25% popiołu z kukurydzy 75% popiołu z zrębka.
13. Mix 32: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 32 g popiołu wymieszanego w proporcji: 25% kukurydzy 75% zrębka.
14. Kuku+Wapn 8: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 8 g popiołu wymieszanego w proporcji: 50% popiołu z kukurydzy + 50 % popiołu z biomasy spalonej w obecności wapna.
15. Kuku+Wapn 16: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 16 g popiołu wymieszanego w proporcji: 50% popiołu z kukurydzy + 50 % popiołu z biomasy spalonej w obecności wapna.
16. Kuku+Wapn 32: Gleba + 1 g SA + 1 g MAP + 32 g popiołu wymieszanego w proporcji: 50% popiołu z kukurydzy + 50 % popiołu z biomasy spalonej w obecności wapna.

Gdzie symbole oznaczają:

- SA - saletra amonowa 34%N;
- MAP – fosforan amonu 12% N 52% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;
- KCl – sól potasowa 60% K<sub>2</sub>O.
- Masa gleby użyta w doświadczeniu: 7 kg

Dobór dawki popiołów:

- Dawka popiołów w przeliczeniu na 1 ha wyniosła:
- dla dawki 8 g / donica -> 2 Mg ha<sup>-1</sup>
- dla dawki 16 g /donica -> 4 Mg ha<sup>-1</sup>
- dla dawki 32 g /donica -> 8 Mg ha<sup>-1</sup>



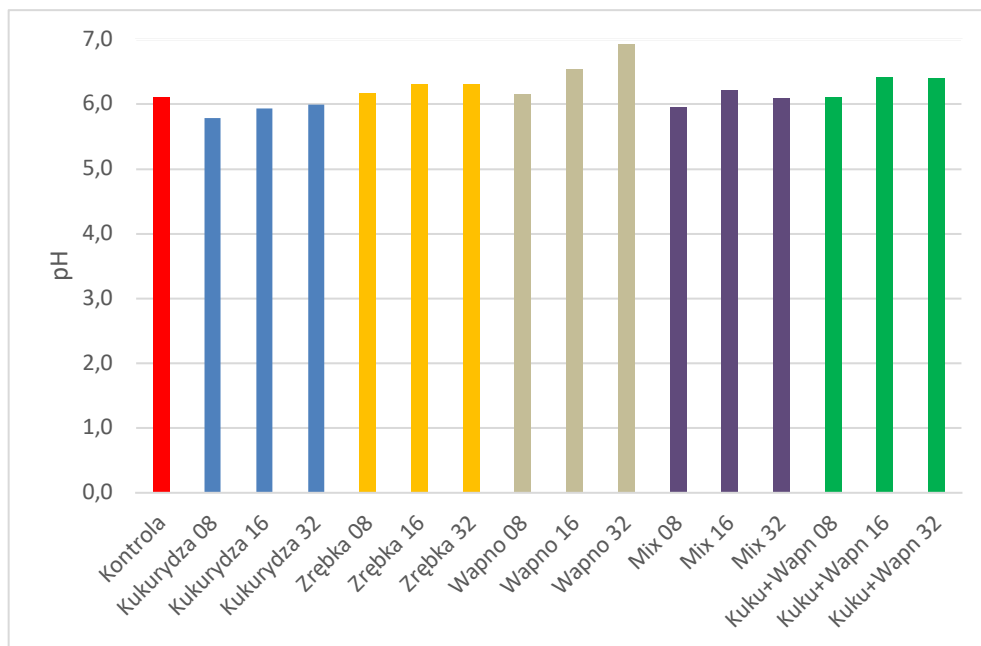
**Rysunek 3.** Donice z przygotowanym podłożem (Źródło: Fot. własna).

Po zbiorze buraków ćwikłowych donice z glebą wykorzystano do przeprowadzenia drugiego etapu badań związanego z żytem, jesienią 2023 r. przedstawione na rysunku 24. Badania te mają za zadanie wskazać możliwości długofalowej uprawy na glebach wcześniej wzbogacanych popiołami w systemie płodozmianu.

### **7.3. Długofalowy wpływ dozowanego popiołu na właściwości gleby**

Ponad rok od zastosowania popiołów pod uprawę buraka ćwikłowego w badanej glebie nadal utrzymywał się efekt odkwaszający, ale nie stwierdzono tego w przypadku popiołu ze spalania kukurydzy co widać na poniższym rysunku (nawet gdy mieszano z popiołem ze zrębek drzewnych). Obiekty, gdzie zastosowano popiół ze zrębek nadal wykazały zakwaszenie niższe niż obiekt kontrolne, należy więc uznać, że nastąpiła tu (podobnie jak dla obiektów z użyciem wapna co wydaje się oczywiste) trwała poprawa odczynu gleby, co ma niezwykle znaczące efekty na życie biologiczne i żyzność gleb.

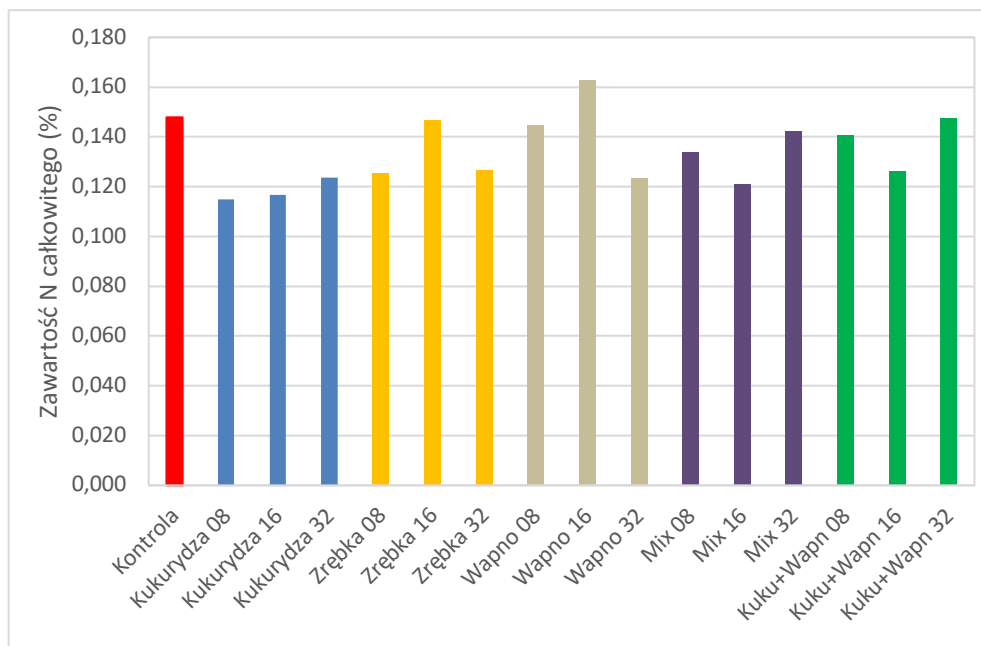
Analizując wyniki można zatem stwierdzić, że zastosowanie popiołów daje możliwość odkwaszenia gleby tj. podniesienia jej odczynu, a efekt zależy od rodzaju popiołu i zastosowanej dawki co obrazuje rysunek 25. Podobne obserwacje dotyczące odkwaszającej roli popiołów można znaleźć w literaturze. Przykładowo zastosowanie popiołu drzewnego w lasach spowodowało przeciwdziałanie zakwaszeniu gleby i wzrost odczynu (Bang-Andreasen i in., 2021).



**Rysunek 4.** Odczyn gleby (pH w 1 M KCl) po zastosowaniu różnych rodzajów popiołów w zróżnicowanych dawkach (Źródło: Badania własne).

#### **Wpływ zastosowanych popiołów na zawartość azotu w glebie:**

W analizowanych próbkach gleby zbadano procentową zawartość azotu co przedstawia rysunek 26. Mieściła się ona w granicach od 0,11 do 0,16% co przedstawiono na poniższym rysunku. Jedynie obiekt Wapno 16 charakteryzował się istotnie wyższą wielkością tego parametru w porównaniu do kontroli (jak i do większości innych wariantów doświadczenia). Zaprezentowane wyniki określają sumaryczną ilość azotu, zarówno w związkach organicznych jak i mineralnych. Warto przypomnieć, że koncentracja azotu w popiołach była niewielka w porównaniu z pozostałymi składnikami, dlatego też nie występuje tutaj efekt wniesienia składników pokarmowych. Warto zauważyć, że zawartość azotu w glebie uzależniona jest głównie od kierunków i natężenia procesów mikrobiologicznych i wykazuje korelację ze wzrostem odczynu gleby.

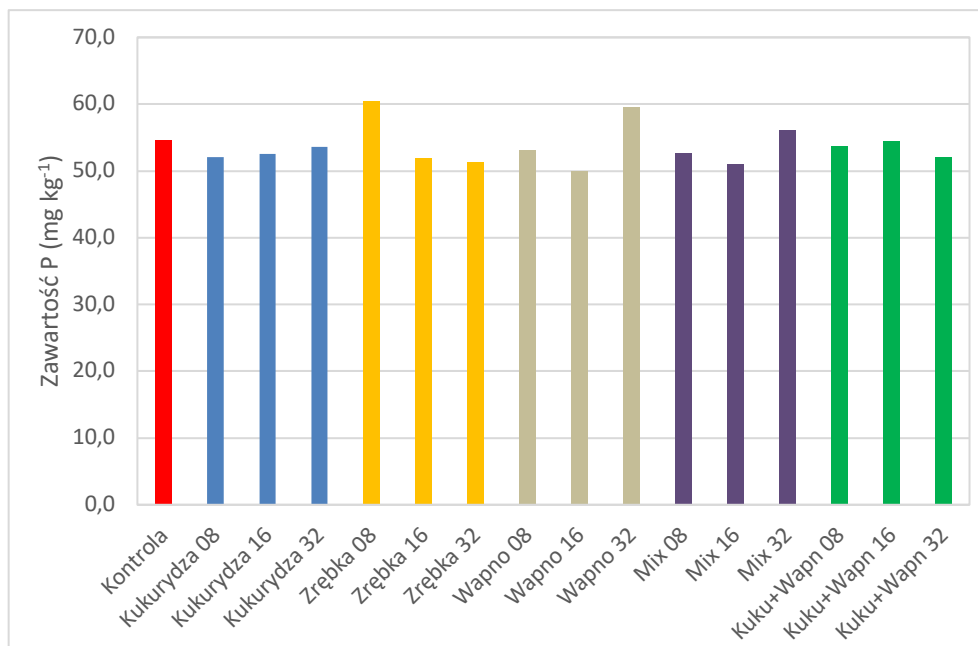


**Rysunek 5.** Zawartość azotu w glebie (Źródło: Badania własne).

Wyniki te potwierdzają hipotezę, że stosowanie popiołu nie wpływa na zwiększenie ilości azotu w glebie. Może natomiast wpływać na jego dostępność i formę wskutek, np. zwiększenia odczynu gleby i aktywności mikrobiologicznej. Z punktu widzenia żywienia roślin ma to znaczenie, bowiem tylko formy mineralne azotu są dostępne dla rośliny.

#### **Wpływ zastosowanych popiołów na zawartość fosforu w glebie:**

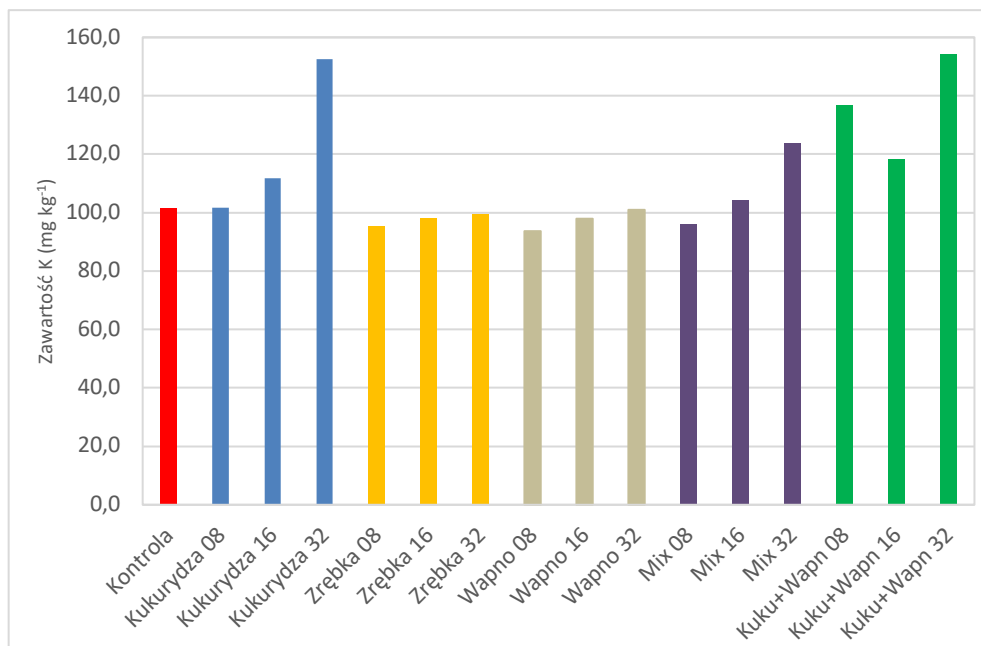
Zawartość fosforu, w żaden sposób nie była skorelowana ani z rodzajem, ani z dawką zastosowanych popiołów co dokładnie obrazuje tabela 24. oraz rysunek 27. Może się to wydawać dość zaskakujące, ale prowadzona analiza obejmowała (jak zawsze w badaniach chemiczno-rolniczych) wyłącznie przyswajalne formy tego pierwiastka, które w czasie mogą się bardzo zmieniać, a reprezentatywne wyniki będzie można otrzymać po dłuższym czasie inkubacji, a jego zawartość w glebie zmienia się w zależności od pH i aktywności mikroorganizmów glebowych. Jak wiadomo składnik ten we wszystkich popiołach występuje najczęściej w formach nieprzyswajalnych dla roślin i jego uruchomienie trwać może długi czas i zależy od wielu czynników, czyli w czasie prowadzenia analiz składnik ten mógł być trwale związany w glebie.



**Rysunek 6.** Zawartość fosforu w glebie (Źródło: Badania własne).

### **Wpływ zastosowanych popiołów na zawartość potasu w glebie**

Zastosowanie popiołów miało wpływ na zawartość potasu w glebie co przedstawia rysunek 28, a efekt zależał od rodzaju i dawki zastosowanego popiołu. Gleba użyta w eksperymencie (obiekt kontrolny) charakteryzowała się średnią zawartością potasu wynoszącą ponad 100 mg K kg<sup>-1</sup>. Zastosowanie popiołów pochodzących ze spalania osadków kolb kukurydzy (kukurydza) spowodowało istotne zwiększenie poziomu potasu w glebie zależnie od zastosowanej dawki (tj. 16 i 32 g wazon<sup>-1</sup>). Popiół ten w największym stopniu wpłynął na zwiększenie potasu w glebie. W przypadku pozostałych typów popiołów istotne zwiększenie ilości oznaczonego popiołu występowało przy maksymalnej dawce 32 g dla popiołu ze zrębki drzewnej, mieszanki popiołu drzewnego i kukurydzy (Mix), a także mieszance popiołu z kukurydzy i ze spalania biomasy drzewnej w obecności wapnia (Kuku+Wapn). Istotnego wzrostu nie odnotowano w przypadku trzech obiektów z zastosowaniem samego wapnia. Zawartość potasu w glebie została przedstawiona na poniższym wykresie, a obliczenia statystyczne zawarte są w tabeli 24.



**Rysunek 7.** Zawartość potasu w glebie (Źródło: Badania własne).

Zestawiając ze sobą obserwacje dotyczące właściwości odkwaszających popiołów pochodzący z spalania biomasy w obecności wapnia wykazywał największe spośród innych właściwości odkwaszające, ale równocześnie wnosi najmniejszą ilość potasu do gleby. Z drugiej strony popiół ze spalania osadek kolb kukurydzy wniósł do gleby największą ilość potasu a równocześnie miał również znaczenie dla zwiększenia odczynu gleby.

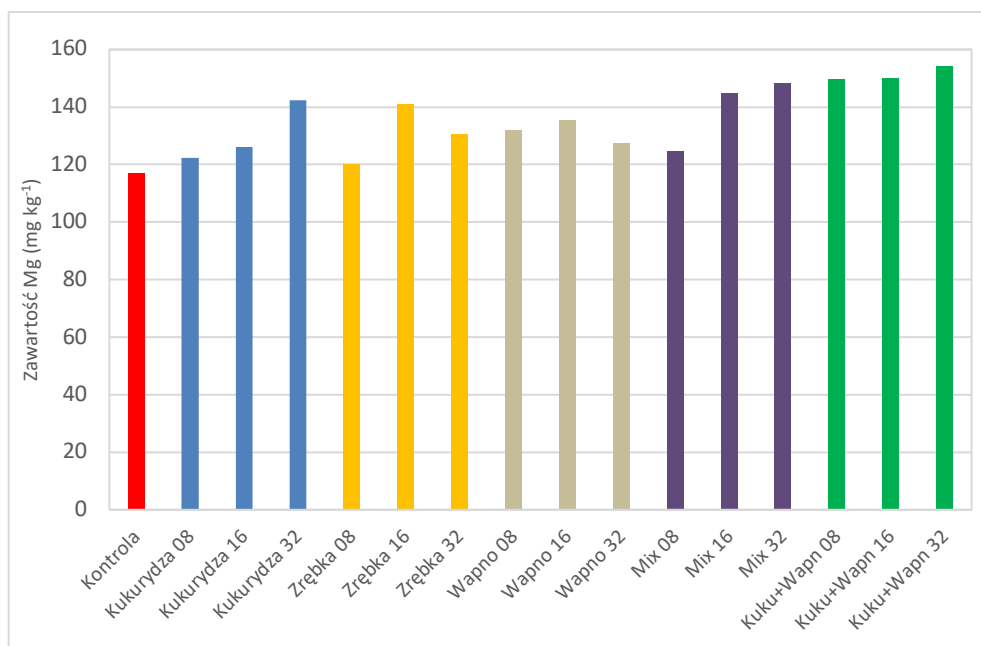
Obserwacje są zgodne z danymi literaturowymi (Füzesi i in. 2015) które wskazują na znaczenie popiołów pochodzących ze spalania biomasy roślinnej we wnoszeniu potasu do gleby. Należy zwrócić uwagę na fakt, że wysokie dawki popiołu, w szczególności z osadek kukurydzy mogą prowadzić do przekroczenia jego optymalnego poziomu w glebie co nastąpiło w przypadku gleby badanej w doświadczeniu, która jako gleba użytkowana rolniczo miała już wysoką zawartość tego składnika.

### **Wpływ zastosowanych popiołów na zawartość magnezu w glebie:**

Gleba użyta w eksperymencie (kontrola) charakteryzowała się zawartością magnezu wynoszącą 117 mg Mg kg<sup>-1</sup> co można zobaczyć na rysunku 29. Zastosowanie popiołów miało w większości analizowanych wariantów istotny wpływ na zwiększenie poziomu

magnezu w glebie i można także zauważyć wzrost koncentracji tego składnika wraz ze zwiększeniem dawki wnoszonego popiołu.

Istotne zwiększenie poziomu magnezu zostało odnotowane w przypadku zastosowania popiołu z kukurydzy w dawce 32 g jak i wapna i popiołu mieszanego w tej samej dawce.



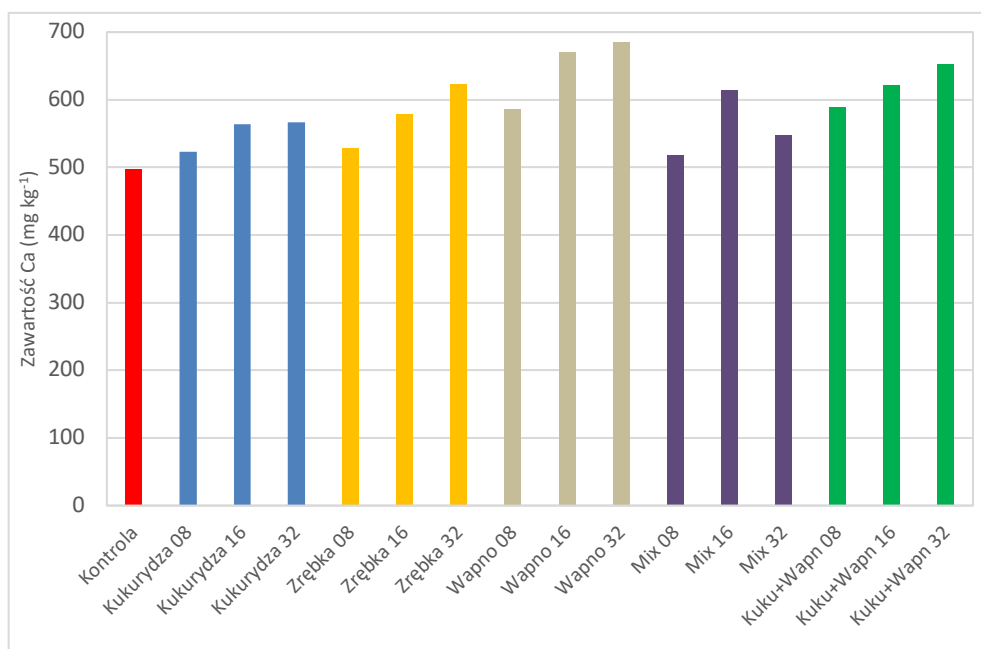
**Rysunek 8.** Zawartość magnezu w glebie (Źródło: Badania własne).

Popioły pochodzące ze spalania biomasy posiadają w swoim składzie magnez, choć jego ilość jest zdecydowanie mniejsza niż w przypadku potasu. Doniesienia literaturowe (Füzesi i in. 2015) potwierdzają, że stosowania popiołów ze spalania biomasy drzewnej prowadzi do wzrostu zawartości magnezu w glebie.

#### **Wpływ zastosowanych popiołów na zawartość wapnia w glebie:**

Popioły, za wyjątkiem tych uzyskanych ze spalania rdzeni kolb kukurydzy miały wpływ na zawartość wapnia w glebie. Istotne zwiększenie zawartości tego pierwiastka odnotowano w przypadku zastosowania wszystkich popiołów w dawkach 16 i 32 g wazon<sup>-1</sup>. W przypadku wariantów Wapno i Kuku+Wapn zaobserwować można wysoce istotny wzrost poziomu wapnia w glebie wraz ze zwiększaniem dawki popiołu

z 16 do 32 g wazon<sup>-1</sup>. Wyniki dotyczące zawartości przyswajalnej formy wapnia w glebie zostały przedstawione na poniższym wykresie i w tabeli 24 oraz na rysunku 30.



Rysunek 9. Zawartość wapnia w glebie (Źródło: Badania własne).

Tabela 13. Zawartość makroskładników w glebie pobranej po zbiorze żyta.

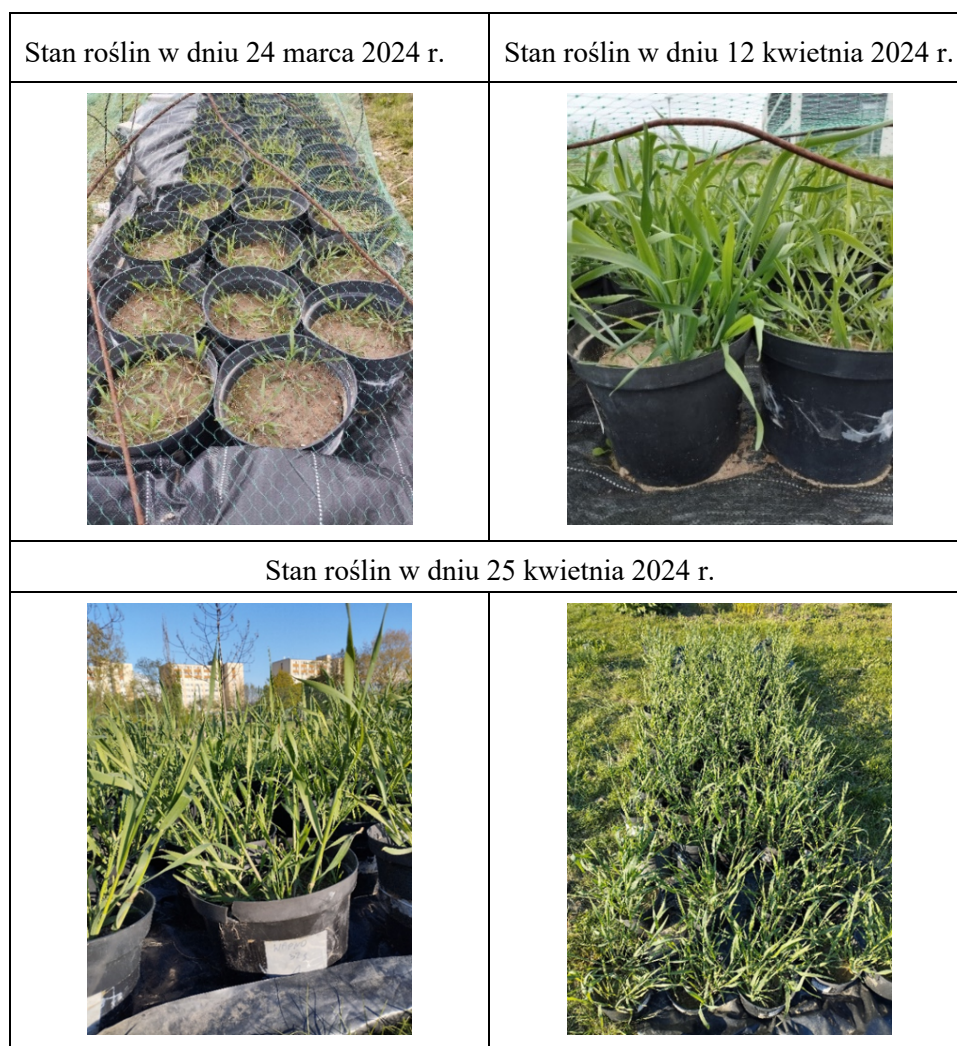
Obiekt	Dawka (g wazon <sup>-1</sup> )	Azot (% N)	Fosfor (mg P kg <sup>-1</sup> )	Potas (mg K kg <sup>-1</sup> )	Magnez (mg Mg kg <sup>-1</sup> )	Wapń (mg Ca kg <sup>-1</sup> )
<b>Kontrola</b>	0	0,148 <sup>b</sup>	54,7 <sup>bc</sup>	101,3 <sup>b</sup>	117 <sup>a</sup>	498 <sup>a</sup>
<b>Popiół kukurydza</b>	8	0,115 <sup>a</sup>	52,0 <sup>ab</sup>	101,6 <sup>b</sup>	122 <sup>ab</sup>	523 <sup>a</sup>
	16	0,117 <sup>a</sup>	52,6 <sup>b</sup>	111,7 <sup>c</sup>	126 <sup>ab</sup>	564 <sup>b</sup>
	32	0,124 <sup>a</sup>	53,6 <sup>b</sup>	152,6 <sup>e</sup>	142 <sup>bc</sup>	567 <sup>b</sup>
<b>Popiół zrębka</b>	8	0,125 <sup>a</sup>	60,4 <sup>d</sup>	95,5 <sup>a</sup>	120 <sup>ab</sup>	528 <sup>a</sup>
	16	0,147 <sup>b</sup>	51,9 <sup>ab</sup>	98,1 <sup>ab</sup>	141 <sup>bc</sup>	579 <sup>b</sup>
	32	0,127 <sup>a</sup>	51,4 <sup>ab</sup>	99,5 <sup>ab</sup>	131 <sup>b</sup>	623 <sup>bc</sup>
<b>Wapno</b>	8	0,145 <sup>b</sup>	53,1 <sup>bc</sup>	93,7 <sup>a</sup>	132 <sup>b</sup>	586 <sup>b</sup>
	16	0,163 <sup>c</sup>	49,9 <sup>a</sup>	97,9 <sup>ab</sup>	135 <sup>b</sup>	671 <sup>c</sup>
	32	0,123 <sup>a</sup>	59,5 <sup>d</sup>	101,0 <sup>b</sup>	127 <sup>ab</sup>	685 <sup>c</sup>
<b>Popiół Mix</b>	8	0,134 <sup>ab</sup>	52,6 <sup>b</sup>	96,1 <sup>a</sup>	124 <sup>ab</sup>	518 <sup>a</sup>
	16	0,121 <sup>a</sup>	51,0 <sup>ab</sup>	104,2 <sup>b</sup>	145 <sup>bc</sup>	615 <sup>bc</sup>
	32	0,142 <sup>b</sup>	56,1 <sup>c</sup>	123,6 <sup>cd</sup>	148 <sup>bc</sup>	548 <sup>ab</sup>
<b>Popiół kukurydza + wapno</b>	8	0,141 <sup>b</sup>	53,7 <sup>b</sup>	136,8 <sup>d</sup>	150 <sup>c</sup>	590 <sup>b</sup>
	16	0,126 <sup>a</sup>	54,4 <sup>b</sup>	118,4 <sup>c</sup>	150 <sup>c</sup>	622 <sup>bc</sup>
	32	0,148 <sup>b</sup>	52,0 <sup>ab</sup>	154,1 <sup>e</sup>	154 <sup>c</sup>	653 <sup>c</sup>

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

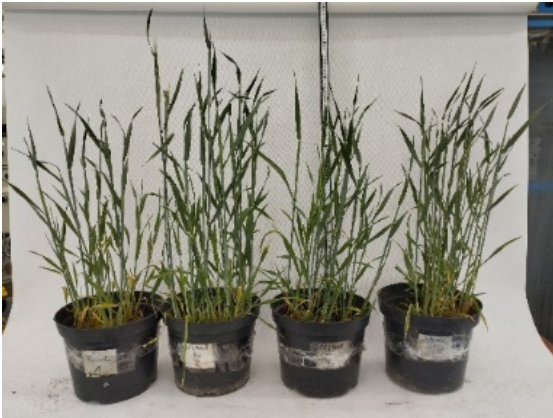
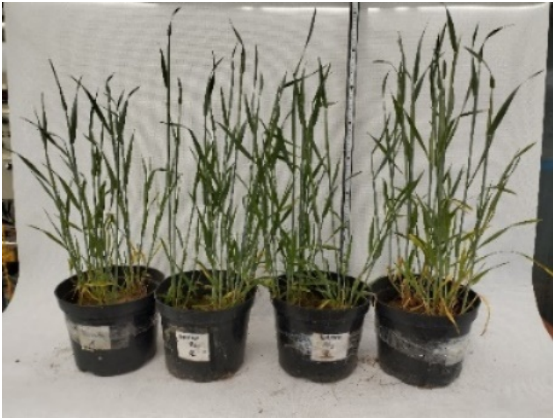
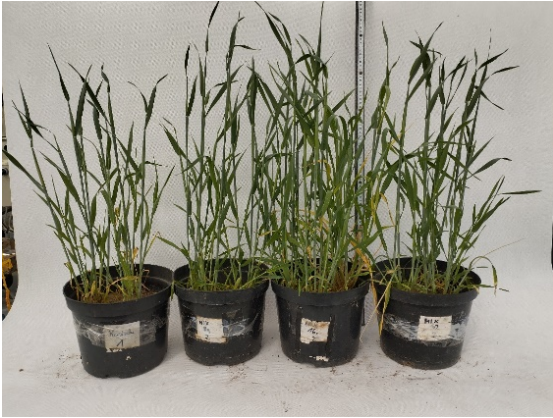
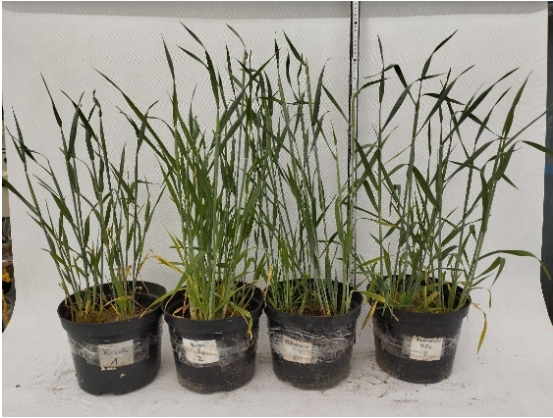


#### 7.4. Badania wazonowe z wykorzystaniem popiołu – plonowanie żyta

Do każdej z donic wysiano po 5 nasion żyta ozimego, a doświadczenie zostało założone w 5 powtórzeniach. W celu zabezpieczenia roślin przed szkodami wywołanymi przez ptaki donice zabezpieczono na okres zimy siatką. Wiosną przeprowadzono selekcję i w każdej donicy pozostawiono po 3 rośliny. Zaaplikowano także nawóz azotowy: saletrę amonową w ilości 2g/donicę. Rośliny utrzymywano w donicach do osiągnięcia dojrzałości pełnej, po czym zostały one zebrane. Pobrano również próbki gleby.

W badaniach kularowych przeprowadzono analizę plonów i parametrów plonowania zebranych roślin po zbiorach żyta 17 lipca 2024 roku. Próbki słomy i ziarna zmielono i przeprowadzono analizy składu chemicznego materiału roślinnego. Analizie poddano również próbki gleby.



**Rysunek 10.** Stan doświadczenia w marcu i kwietniu 2024 r. (Źródło: Fot. własna).

Stan doświadczenia w dniu 6 maja 2024 r.	
Od lewej: Kontrola, Zrębka 8g, Zrębka 16g, Zrębka 32 g	Od lewej: Kontrola, Wapno 8g, Wapno 16g, Wapno 32g
	
Od lewej: Kontrola, Mix 8g, Mix 16g, Mix 32 g	Od lewej: Kontrola, Kukurydza 8g, Kukurydza 16g, Kukurydza 32g
	
Od lewej: Kontrola, Kuku+Wapn 8, Kuku+Wapn 16, Kuku+Wapn 32	Stan doświadczenia w dniu 8 lipca 2024 r.
	

**Rysunek 11.** Stan doświadczenia w maju i lipcu 2024 r. (Źródło: Fot. własne).

### **Omówienie wyników plonowania żyta:**

Podstawowym kryterium efektywności substancji stosowanych do gleb rolniczych jest ich korzystny wpływ na plonowanie roślin. Zestawienie plonu biomasy żyta jak i komponentów plonu przedstawiono w tabeli 25.

Plonem użytkowym zbóż jest zarówno ziarno jak i słoma (w niniejszym opracowaniu plon słomy stanowi suma plonu źdźbeł i osadek kłosowych wraz z plewami). Osiągnięcie wysokiego plonu ziarna o dobrych właściwościach użytkowych jest rzeczą jasną podstawowym celem uprawy zbóż. Warto zauważyć, że w wielu przypadkach z obiektów doświadczalnych zebrano istotnie wyższy plon ziarna niż z wazonów kontrolnych a odnotowano także plony ziarna niższe niż z kontroli, ale tu z kolei te różnice „na minus” nie okazały się statystycznie udowodnione.

Szczególnie wysokie plonotwórcze działanie wykazał popiół ze spalania kolb kukurydzy zastosowany w dawce 8 g wazon<sup>-1</sup> (najwyższy istotnie statystycznie plon odnotowany w doświadczeniu – 39,5 g ziarna wazon<sup>-1</sup> czyli o niemal 30% przewyższający plonowanie obiektu kontrolnego) a także dla tego samego popiołu zastosowanego wraz z wapnem w dawkach 16 i 32 g wazon<sup>-1</sup>. Zbliżone plony ziarna (wyższe o 20% od plonów obiektu kontrolnego) otrzymano także w obiektach gdzie zastosowano wapno w dawce 32 g wazon<sup>-1</sup> i popiół mieszany w dawce 16 g wazon<sup>-1</sup>. Świadczy to o możliwości praktycznej utylizacji tych substancji w rolnictwie bowiem spełniony zostaje postulat efektywności nawozowej i istnieje szansa zmniejszenia zużycia nawozów sztucznych co może razem dawać pożądane efekty środowiskowe.

Nieco odmiennie przedstawiał się wpływ zastosowanych substancji odpadowych na plon części wegetatywnych żyta (słomy). Słoma żyta ma wiele zastosowań od paszowych do nawozowych i energetycznych, czyli także ważne jest, aby uzyskiwany plon słomy był wysoki i stabilny. Odnotowano tu generalnie brak plonotwórczego wpływu zastosowania substancji odpadowych ze spalania biomasy na ten parametr (choć wszystkie spadki plonu w stosunku do obiektu kontrolnego mieściły się w granicach błędu statystycznego) a także stwierdzono istotny wzrost plonu słomy w stosunku do obiektu kontrolnego dla jednego obiektu tj. popiołu z kukurydzy z wapnem w dawce 16 g wazon<sup>-1</sup>.

Plon biomasy nadziemnej żyta był także kształtowany przez dogłębne zastosowanie w doświadczeniu badanych substancji odpadowych. W jednym przypadku, czyli obiektu z popiołem mieszanym w dawce 8 g wazon<sup>-1</sup> odnotowano istotny spadek plonu biomasy nadziemnej, natomiast w większości przypadków plon ten był na poziomie obiektu

kontrolnego. Żyto rosące na glebie z dodatkiem popiołu z kukurydzy w dawce 8 g wazon<sup>-1</sup> jak i tego samego popiołu wraz z wapnem w dawkach 16 i 32 g wazon<sup>-1</sup> wykazało najwyższe istotnie plony biomasy nadziemnej, co było głównie wynikiem wysokich plonów ziarna stwierdzonych na tych obiektach.

Wartości indeksu żniwnego (czyli stosunku masy ziarna do masy nadziemnej wyrażony w procentach) kształtowały się od 47,6 (obiekt kontrolny) do 52,5% (obiekt wapno 32 g wazon<sup>-1</sup>) – różnica istotna statystycznie. Świadczy to korzystnie o wpływie nawożenia substancjami odpadowymi na produktywność żyta.

Analizowano także zmienność komponentów plonu, aby stwierdzić w jaki sposób mogło dojść do modyfikacji plonów ziarna. Jedno okazało się pewne, że stopień wypełnienia ziarna (parametr masy tysiąca ziaren MTZ) nie był kształtowany przez dodatek substancji odpadowych do gleby wszystkie bowiem różnice w masie tysiąca ziaren mieściły się w granicach błędu statystycznego.

Natomiast analiza zmienności takich komponentów plonu jak liczba ziaren z rośliny jednoznacznie wykazała, że zastosowanie substancji odpadowych miało korzystny wpływ na tę podstawową dla plonowania cechę gdzie wykazano statystycznie, że żyto rosące na glebie z dodatkiem popiołu z kukurydzy w dawce 8 g wazon<sup>-1</sup> dało najwyższy plon w doświadczeniu wskutek zawiązania i wypełnienia największej liczby ziarniaków, także wysoką wartość tego parametru (nawet o 40% wyższy niż w obiekcie kontrolnym) wykazano dla obiektu z popiołem mieszanym w dawce 16 g wazon<sup>-1</sup>, co jednoznacznie świadczy o korzystnym oddziaływaniu użytych w doświadczeniu substancji odpadowych na cechy plonotwórcze żyta przedstawione w poniższej tabeli.

Także analizując wpływ dodatków do gleby na długość kłosa warto zauważyć, że ten komponent plonu kształtował się w granicach błędu statystycznego, ale żyto z jednego obiektu (popiół ze zrębek w dawce 32 g wazon<sup>-1</sup>) wykazało się istotnie najdłuższymi kłosami w doświadczeniu.

Liczba ziaren w przeliczeniu na roślinę okazała się istotnie modyfikowana przez czynnik doświadczenia. Analiza tego wpływu ponownie potwierdza, że doglebowe użycie popiołów biomasowych może być uznane za korzystny dla produkcji rolnej sposób ich utylizacji. Najniższą wartość tego komponentu plonowania stwierdzono dla roślin kontrolnych, a o ponad 30% więcej ziaren wykształconych na roślinie wykazano dla obiektu z popiołem mieszanym w dawce 16 g wazon<sup>-1</sup> i podobną wartość odnotowano dla nawożenia popiołem ze spalania kolb kukurydzy w dawce 8 g wazon<sup>-1</sup>.

**Tabela 14.** Plon i cechy biometryczne żyta w doświadczeniu wazonowym.

Obiekt	Dawka (g wazon <sup>-1</sup> )	Plon ziarna (g wazon <sup>-1</sup> )	Plon słomy (g wazon <sup>-1</sup> )	Plon biomasy nadziemnej (g wazon <sup>-1</sup> )	Indeks żniwny (%)	MTZ (g)	Liczba ziaren roślina <sup>-1</sup>	Długość żdźbła (cm)	Długość kłosa (cm)	Liczba kłosów roślina <sup>-1</sup>
<b>Kontrola</b>	0	29,3 <sup>ab</sup>	32,2 <sup>ab</sup>	61,5 <sup>b</sup>	47,6 <sup>a</sup>	31,0	316 <sup>a</sup>	73,2 <sup>c</sup>	9,0 <sup>ab</sup>	7,1 <sup>ab</sup>
<b>Popiół kukurydza</b>	8	39,5 <sup>d</sup>	36,6 <sup>bc</sup>	76,1 <sup>d</sup>	52,0 <sup>b</sup>	31,4	423 <sup>d</sup>	68,5 <sup>b</sup>	8,9 <sup>ab</sup>	7,9 <sup>b</sup>
	16	32,4 <sup>b</sup>	33,0 <sup>b</sup>	65,4 <sup>b</sup>	49,5 <sup>ab</sup>	31,9	340 <sup>b</sup>	71,3 <sup>bc</sup>	8,9 <sup>ab</sup>	7,1 <sup>ab</sup>
	32	33,0 <sup>bc</sup>	33,5 <sup>b</sup>	66,5 <sup>b</sup>	49,5 <sup>ab</sup>	32,4	337 <sup>ab</sup>	69,6 <sup>b</sup>	8,9 <sup>ab</sup>	7,7 <sup>b</sup>
<b>Popiół zrębka</b>	8	33,9 <sup>bc</sup>	32,9 <sup>b</sup>	66,8 <sup>b</sup>	50,9 <sup>b</sup>	30,1	375 <sup>b</sup>	67,0 <sup>b</sup>	9,1 <sup>ab</sup>	7,7 <sup>b</sup>
	16	33,2 <sup>bc</sup>	31,6 <sup>ab</sup>	64,8 <sup>b</sup>	51,0 <sup>b</sup>	29,8	369 <sup>b</sup>	66,3 <sup>b</sup>	9,0 <sup>ab</sup>	7,7 <sup>b</sup>
	32	36,0 <sup>bc</sup>	33,6 <sup>b</sup>	69,6 <sup>c</sup>	51,9 <sup>b</sup>	30,4	384 <sup>c</sup>	69,0 <sup>bc</sup>	9,6 <sup>c</sup>	6,9 <sup>ab</sup>
<b>Wapno</b>	8	32,2 <sup>b</sup>	32,7 <sup>ab</sup>	64,9 <sup>b</sup>	49,8 <sup>ab</sup>	31,2	347 <sup>b</sup>	71,9 <sup>bc</sup>	8,8 <sup>a</sup>	7,5 <sup>b</sup>
	16	32,1 <sup>b</sup>	30,3 <sup>a</sup>	62,4 <sup>b</sup>	51,4 <sup>b</sup>	31,0	340 <sup>b</sup>	70,4 <sup>bc</sup>	9,1 <sup>ab</sup>	7,1 <sup>ab</sup>
	32	37,6 <sup>c</sup>	34,1 <sup>b</sup>	71,7 <sup>c</sup>	52,5 <sup>c</sup>	31,6	415 <sup>d</sup>	75,0 <sup>d</sup>	9,1 <sup>ab</sup>	7,7 <sup>b</sup>
<b>Popiół Mix</b>	8	27,3 <sup>a</sup>	29,0 <sup>a</sup>	56,3 <sup>a</sup>	48,2 <sup>a</sup>	30,5	309 <sup>a</sup>	68,0 <sup>b</sup>	8,6 <sup>a</sup>	7,2 <sup>ab</sup>
	16	38,6 <sup>c</sup>	36,2 <sup>b</sup>	74,9 <sup>cd</sup>	51,3 <sup>b</sup>	29,9	433 <sup>c</sup>	71,0 <sup>bc</sup>	9,3 <sup>b</sup>	8,3 <sup>c</sup>
	32	31,0 <sup>b</sup>	30,9 <sup>a</sup>	61,9 <sup>b</sup>	49,9 <sup>ab</sup>	29,7	325 <sup>ab</sup>	71,1 <sup>bc</sup>	9,0 <sup>ab</sup>	6,5 <sup>a</sup>
<b>Popiół kukurydza + wapno</b>	8	29,8 <sup>ab</sup>	29,3 <sup>a</sup>	59,1 <sup>ab</sup>	50,5 <sup>b</sup>	32,0	334 <sup>ab</sup>	63,9 <sup>ab</sup>	8,7 <sup>a</sup>	7,4 <sup>b</sup>
	16	34,7 <sup>c</sup>	37,7 <sup>c</sup>	72,4 <sup>c</sup>	47,8 <sup>a</sup>	29,8	365 <sup>bc</sup>	66,4 <sup>b</sup>	9,3 <sup>b</sup>	8,4 <sup>c</sup>
	32	35,6 <sup>c</sup>	35,5 <sup>b</sup>	71,1 <sup>c</sup>	49,9 <sup>ab</sup>	32,3	393 <sup>c4</sup>	62,8 <sup>a</sup>	9,2 <sup>b</sup>	8,8 <sup>c</sup>

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

### **Skład chemiczny biomasy w biomase nadziemnej:**

Koncentracja najważniejszego z pierwiastków z punktu widzenia jakości żywności co zaprezentowano w tabeli 26, czyli azotu zarówno w słomie jak i w ziarnie żyta okazała się silnie modyfikowana przez użyte doglebowo substancje odpadowe. Z punktu widzenia agronomicznego i energetycznego „idealna” roślina żyta powinna zawierać jak najmniej azotu w słomie i jak najwięcej azotu w ziarnie. Postulat ten był spełniony w przypadku zastosowania popiołu ze spalania kukurydzy w dawce 32 g wazon<sup>-1</sup> i popiołu ze zrębki w takiej samej dawce.

Koncentracja fosforu w ziarnie żyta przewyższała wielokrotnie koncentracje P w słomie. Warte zauważenia jest to, że koncentracja fosforu w słomie ulegała silnej modyfikacji w zależności od zastosowanego nawożenia popiołami - była minimalna (0,26 g P kg<sup>-1</sup>) w obiekcie z nawożeniem popiołem ze spalania zrębek w dawce 32 g wazon<sup>-1</sup>, a w przypadku obiektu z popiołem kukurydzy z wapnem w dawce 8 g wazon<sup>-1</sup> - 1,05 g P kg<sup>-1</sup>. Natomiast zawartość fosforu w ziarnie nie podlegała takim modyfikacjom i jedynie ziarno zebrane z wazonów nawożonych popiołem ze zrębki w dawce 16 g wazon<sup>-1</sup> zawierało istotnie więcej fosforu niż zebrane z innych obiektów doświadczalnych.

Koncentracja potasu w odróżnieniu od fosforu była niezwykle zmienna i o wiele wyższa w częściach wegetatywnych niż w ziarnie po prezentuje powyższa tabela. Szczególnie wysoką zawartość tego pierwiastka stwierdzono w słomie żyta zebranego na glebie nawożonej popiołem ze spalania kolb kukurydzy od 12,8 do 14,9 g K kg<sup>-1</sup> (w słomie roślin kontrolnych było 8,4 g K kg<sup>-1</sup>). Co interesujące w kilku przypadkach stwierdzono w słomie zawartość potasu znacznie niższą niż u roślin kontrolnych (na przykład popiół mieszany zastosowany w dawce 32 g wazon<sup>-1</sup> spowodował obniżenie zawartości K w słomie do 4,46 g K kg<sup>-1</sup>), co mogło być spowodowane zaburzeniem stosunków kationowych w glebie. Zawartość potasu w ziarnie żyta była nieco mniej zróżnicowana niż koncentracja K w słomie, szczególnie interesująco przedstawiał się pod tym względem obiekt popiołów mieszany w dawce 32, gdzie wykazano najniższą w doświadczeniu zawartość potasu w słomie, a najwyższą spośród wszystkich obiektów koncentrację potasu w ziarnie.

**Tabela 15.** Zawartość makroelementów w organach nadziemnych żyta w doświadczeniu wazonowym.

Obiekt	Dawka (g wazon <sup>-1</sup> )	Azot (g N kg <sup>-1</sup> )		Fosfor (g P kg <sup>-1</sup> )		Potas (g K kg <sup>-1</sup> )		Sód (g Na kg <sup>-1</sup> )		Wapń (g Ca kg <sup>-1</sup> )		Magnez (g Mg kg <sup>-1</sup> )	
		śłoma	ziarno	śłoma	ziarno	śłoma	ziarno	śłoma	ziarno	śłoma	ziarno	śłoma	ziarno
<b>Kontrola</b>	0	5,58 <sup>bc</sup>	11,5 <sup>a</sup>	0,43 <sup>ab</sup>	4,13 <sup>ab</sup>	8,39 <sup>c</sup>	3,42 <sup>a</sup>	0,15 <sup>a</sup>	0,14 <sup>b</sup>	1,91 <sup>a</sup>	0,36 <sup>ab</sup>	0,52 <sup>ab</sup>	0,52 <sup>ab</sup>
<b>Popiół kukurydza</b>	8	5,81 <sup>bc</sup>	12,4 <sup>ab</sup>	0,48 <sup>ab</sup>	3,93 <sup>ab</sup>	14,85 <sup>c</sup>	3,03 <sup>a</sup>	0,50 <sup>c</sup>	0,12 <sup>b</sup>	2,80 <sup>b</sup>	0,36 <sup>ab</sup>	1,18 <sup>c</sup>	0,51 <sup>ab</sup>
	16	6,77 <sup>c</sup>	14,0 <sup>c</sup>	0,53 <sup>ab</sup>	4,29 <sup>ab</sup>	14,88 <sup>c</sup>	3,61 <sup>ab</sup>	0,28 <sup>b</sup>	0,09 <sup>ab</sup>	2,05 <sup>ab</sup>	0,37 <sup>ab</sup>	0,66 <sup>ab</sup>	0,51 <sup>ab</sup>
	32	5,32 <sup>ab</sup>	14,9 <sup>c</sup>	0,45 <sup>ab</sup>	3,93 <sup>ab</sup>	12,63 <sup>d</sup>	4,14 <sup>bc</sup>	0,23 <sup>b</sup>	0,17 <sup>c</sup>	2,38 <sup>ab</sup>	0,42 <sup>b</sup>	0,63 <sup>ab</sup>	0,50 <sup>ab</sup>
<b>Popiół zrębka</b>	8	4,94 <sup>ab</sup>	11,9 <sup>a</sup>	0,51 <sup>ab</sup>	4,28 <sup>ab</sup>	9,84 <sup>c</sup>	3,22 <sup>a</sup>	0,24 <sup>b</sup>	0,19 <sup>cd</sup>	2,50 <sup>b</sup>	0,31 <sup>ab</sup>	0,73 <sup>b</sup>	0,49 <sup>ab</sup>
	16	4,98 <sup>ab</sup>	12,9 <sup>b</sup>	0,46 <sup>ab</sup>	6,11 <sup>c</sup>	6,19 <sup>b</sup>	3,78 <sup>b</sup>	0,31 <sup>b</sup>	0,13 <sup>b</sup>	3,85 <sup>d</sup>	0,41 <sup>b</sup>	1,20 <sup>c</sup>	0,54 <sup>ab</sup>
	32	4,89 <sup>ab</sup>	13,8 <sup>bc</sup>	0,26 <sup>a</sup>	4,71 <sup>ab</sup>	14,55 <sup>c</sup>	3,69 <sup>b</sup>	0,28 <sup>b</sup>	0,09 <sup>ab</sup>	1,87 <sup>a</sup>	0,35 <sup>ab</sup>	0,58 <sup>ab</sup>	0,55 <sup>ab</sup>
<b>Wapno</b>	8	5,21 <sup>ab</sup>	12,2 <sup>ab</sup>	0,50 <sup>ab</sup>	4,60 <sup>ab</sup>	7,19 <sup>bc</sup>	3,61 <sup>ab</sup>	0,27 <sup>b</sup>	0,09 <sup>ab</sup>	1,64 <sup>a</sup>	0,38 <sup>ab</sup>	0,62 <sup>ab</sup>	0,49 <sup>ab</sup>
	16	5,79 <sup>bc</sup>	13,3 <sup>b</sup>	0,46 <sup>ab</sup>	4,46 <sup>ab</sup>	7,61 <sup>bc</sup>	3,35 <sup>a</sup>	0,23 <sup>b</sup>	0,08 <sup>ab</sup>	2,24 <sup>b</sup>	0,26 <sup>a</sup>	0,62 <sup>ab</sup>	0,50 <sup>ab</sup>
	32	5,03 <sup>ab</sup>	11,9 <sup>a</sup>	0,38 <sup>ab</sup>	4,45 <sup>ab</sup>	5,84 <sup>ab</sup>	2,88 <sup>a</sup>	0,19 <sup>ab</sup>	0,05 <sup>a</sup>	1,94 <sup>a</sup>	0,24 <sup>a</sup>	0,43 <sup>ab</sup>	0,44 <sup>a</sup>
<b>Popiół Mix</b>	8	5,33 <sup>ab</sup>	13,9 <sup>bc</sup>	0,37 <sup>ab</sup>	4,44 <sup>ab</sup>	5,58 <sup>ab</sup>	3,34 <sup>a</sup>	0,22 <sup>b</sup>	0,14 <sup>b</sup>	2,37 <sup>ab</sup>	0,28 <sup>a</sup>	0,50 <sup>ab</sup>	0,49 <sup>ab</sup>
	16	5,62 <sup>bc</sup>	11,4 <sup>a</sup>	0,30 <sup>ab</sup>	4,88 <sup>b</sup>	8,35 <sup>c</sup>	3,45 <sup>a</sup>	0,13 <sup>a</sup>	0,13 <sup>b</sup>	1,38 <sup>a</sup>	0,30 <sup>a</sup>	0,35 <sup>a</sup>	0,50 <sup>ab</sup>
	32	5,12 <sup>ab</sup>	12,2 <sup>ab</sup>	0,42 <sup>ab</sup>	3,83 <sup>a</sup>	4,46 <sup>a</sup>	4,92 <sup>c</sup>	0,21 <sup>ab</sup>	0,18 <sup>c</sup>	2,66 <sup>b</sup>	0,42 <sup>b</sup>	0,57 <sup>ab</sup>	0,67 <sup>c</sup>
<b>Popiół kukurydza +wapno</b>	8	4,46 <sup>a</sup>	12,8 <sup>b</sup>	1,05 <sup>c</sup>	4,84 <sup>ab</sup>	9,98 <sup>c</sup>	4,28 <sup>bc</sup>	0,16 <sup>a</sup>	0,17 <sup>c</sup>	1,95 <sup>a</sup>	0,48 <sup>b</sup>	0,48 <sup>ab</sup>	0,66 <sup>c</sup>
	16	6,05 <sup>bc</sup>	12,5 <sup>ab</sup>	1,37 <sup>cd</sup>	4,75 <sup>ab</sup>	7,07 <sup>bc</sup>	5,30 <sup>c</sup>	0,16 <sup>a</sup>	0,21 <sup>d</sup>	1,60 <sup>a</sup>	0,43 <sup>b</sup>	0,52 <sup>ab</sup>	0,63 <sup>b</sup>
	32	8,93 <sup>d</sup>	16,2 <sup>d</sup>	2,06 <sup>d</sup>	4,67 <sup>ab</sup>	6,53 <sup>b</sup>	8,70 <sup>d</sup>	0,15 <sup>a</sup>	0,30 <sup>c</sup>	1,38 <sup>a</sup>	0,65 <sup>c</sup>	0,39 <sup>a</sup>	0,99 <sup>d</sup>

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Sód to podobnie jak potas pierwiastek, którego stężenie było wyższe w słomie niż w ziarnie. W zasadzie koncentracja Na w słomie zmieniała się w zależności od zastosowanego nawożenia z tym, że w przypadku popiołu mieszanego we wszystkich dawkach i popiołu ze spalania kolb kukurydzy z wapnem stwierdzono poziom zawartości sodu na poziomie obiektu kontrolnego. Koncentracja sodu w ziarnie żyta była stosunkowo niska, ale odnotowano tu pewną zmienność tj. od 0,05 obiekt wapno w dawce 32 g wazon<sup>-1</sup> do 0,21 g Na wazon<sup>-1</sup> - obiekt popiół ze spalania kukurydzy z wapnem w dawce 16 g wazon<sup>-1</sup>.

Analizowano zawartość dwóch ważnych z punktu widzenia paszowego i żywnościowego makropierwiastków dwuwartościowych – wapnia i magnezu. Koncentracja wapnia w słomie kilkukrotnie przewyższała koncentrację tego pierwiastka w ziarnie. Co interesujące zastosowanie wapnia nie spowodowało wzrostu koncentracji Ca w słomie, co stwierdzono pod wpływem zastosowania popiołu ze spalania zrębek drzewnych w dawce 16 g wazon<sup>-1</sup>. Zmienność zawartości wapnia w ziarnie żyta była nie tylko niższa niż koncentracja tego pierwiastka w słomie (w ziarnie wahała się od 0,25 do 0,65 g Ca kg<sup>-1</sup>, a w słomie od 1,38 do 3,85 g Ca kg<sup>-1</sup>), ale też mniej zmienna niż w organach roślinnych.

Zawartość magnezu w słomie żyta w zdecydowanej większości obiektów układała się w pobliżu zawartości 0,5 g Mg kg<sup>-1</sup>, z dwoma wyjątkami o istotnie wyższych zawartościach ok. 1,2 Mg kg<sup>-1</sup>, popiół ze spalania kukurydzy w dawce 8 g wazon<sup>-1</sup> i popiół ze zrębki drzewnej w dawce 16 g wazon<sup>-1</sup>. Nieco mniejszą zmienność zawartości magnezu odnotowano dla koncentracji Mg w ziarnie – wartości w większości przypadków wahały się w zakresie od 0,5 do 0,6 g Mg kg<sup>-1</sup> z jednym wyjątkiem (obiekt z popiołem ze spalania kukurydzy z wapnem w dawce 32 g wazon<sup>-1</sup>) o istotnie wyższym poziomie w porównaniu tj. Mg – 0,99 g Mg kg<sup>-1</sup>.

## **7.5. Ocena wpływu nawożenia popiołami na uprawę żyta i na wydajność fermentacji zacierów żytnich**

Celem przeprowadzonego badania była ocena zastosowania fitopopiołów do nawożenia żyta na przebieg i wydajność fermentacji zacierów oraz skład jakościowo - ilościowy produktów ubocznych fermentacji.

### **Wykorzystywane surowce i materiały:**

1. Próbkę ziarna żyta z upraw nawożonych popiołami ze spalania biomasy,
2. Preparaty enzymatyczne (Novozymes, Dania) do przygotowania zacierów gorzelnicznych:
  - preparat upłynniający Liquoflow (termostabilna  $\alpha$ -amylaza) - 0,2 ml/kg skrobi,
  - preparat scukrzający Saczyme® Plus (amyloglukozydaza) - 0,6 ml/kg surowca,
  - preparat pomocniczy obniżający lepkość zacieru Viscoferm (hydrolazy polisacharydów nieskrobiowych: ksylanaza,  $\beta$ -glukanaza i celulaza) - 0,15 ml/kg surowca,
  - preparat pomocniczy Alphasase AFP (proteaza) katalizujący hydrolizę białek natywnych obecnych w surowców, zwiększający zawartość wolnego azotu aminowego przyswajalnego przez drożdże - 1 ml/kg surowca,
3. Drożdże gorzelnicze SafSpirit HG-1 (Fermentis by Lesaffre, Francja) - 0,5 g/l zacieru.

### **Analiza zacierów słodkich:**

Analiza zacierów słodkich obejmowała oznaczanie pH (pH-meter HandyLab, SI Analytics, Germany) zawartości ekstraktu metodą refraktometryczną (Atago, Tokyo, Japan) oraz cukrów redukujących (maltotriozy, maltozy, glukozy), przed i po hydrolizie dekstryn, metodą HPLC (Agilent 1260 Infinity, Agilent Technologies, USA).

### **Przebieg doświadczenia badawczego:**

Do przygotowania zacierów żytnich wykorzystano metodą bezciśnieniowego uwalniania skrobi (BUS). Surowiec, po wcześniejszym zmieleniu w młynku, mieszano z wodą wodociągową w proporcjach 3,5 L wody na 1 kg surowca. Następnie mieszaninę ogrzewano do temperatury 65°C i dodano preparat enzymatyczny Viscoferm w celu

obniżenia lepkości (żyto zawiera relatywnie dużo ksylanów, które w metodzie BUS powodują nadmierną lepkość zacieru). Po ogrzaniu mieszaniny do około 80°C dodawano preparat upłynniający (Liquoflow), a następnie ogrzewano do 90°C i prowadzono proces upłynniania (dekstrynizacji skrobi) przez 1 godzinę. Po etapie upłynniania, zacier chłodzono do 65°C, dodawano preparaty Saczyme® Plus (amyloglukozydaza) oraz Alphasase AFP (proteaza) i chłodzono do temperatury zadania drożdżami (ok. 30°C). Z gotowego zacieru słodkiego odebrano próbki do analiz fizyko-chemicznych.

Przed zaszczepieniem drożdżami dokonano regulacji pH zacierów do wartości 4,8 z wykorzystaniem roztworu kwasu siarkowego (25% w/v). Odważone w odpowiedniej ilości drożdże suszone przed dodaniem do zacieru rozpuszczono w ciepłej (35°C) wodzie wodociągowej w celu uzyskania mlecza drożdżowego, po czym przeprowadzono tzw. kąpiel kwasową poprzez obniżenie pH mlecza do 2 jednostek, pozostawiono na 15 minut, po czym dodano je bezpośrednio do kolbek fermentacyjnych z zacierem słodkim. Zawartość kolbek fermentacyjnych wymieszano, zakryto rurkami fermentacyjnymi wypełnionymi gliceryną i umieszczono w pomieszczeniu o temperaturze 32°C w celu przeprowadzenia fermentacji zacierów. Proces prowadzono w systemie 72-godzinnym. W celu określenia dynamiki fermentacji poszczególnych prób zacierów monitorowano ubytek masy kolbek związany z wydzielaniem się podczas fermentacji ditlenku węgla.

### **Skład chemiczny ziarna żyta oraz ocena przydatności do celów gorzelniczych przedstawiono w tabeli 27:**

Oceniając skrobiowość badanych próbek ziarna żyta, największą jej wartością (59,523 g/100 g) cechowało się ziarno z uprawy nawożonej popiołem ze zrębków drewna w dawce 16 g wazon<sup>-1</sup>, Należy jednak zwrócić uwagę, że statystycznie nieistotne różnice w skrobiowości, w odniesieniu do tej próbki wykazywało ziarno zarówno z próbki kontrolnej, jak i otrzymane z upraw nawożonych popiołem z: kolb kukurydzy 32g wazon<sup>-1</sup>, ze zrębków drewna (wszystkie badane dawki), z biomasy i wapna defekacyjnego (wszystkie badane dawki), z osadki kukurydzy 25% + Zrębki drewna 75%, 32g wazon<sup>-1</sup> oraz z rdzeni kolb kukurydzy 50%+biomasa i wapno defekacyjne 50% 8g wazon<sup>-1</sup>. Ziarno żyta, które charakteryzowało się statystycznie istotnie najmniejszą skrobiowością (53,033 g/100 g) pochodziło z uprawy nawożonej popiołem pochodzącym ze spalania rdzeni kolb kukurydzy (50%) i biomasy z wapnem defekacyjnym (50%), w dawce 32g wazon<sup>-1</sup>.

Oceniając zawartość cukrów redukujących, mieściła się ona w granicach od 0,824 g glukozy/100 g surowca (wariant nawożenia: rdzenie kolb kukurydzy 25% + Zrębki drewna 75%, 8g wazon<sup>-1</sup> do 1,152 g/100 g (wariant nawożenia: Osadka kukurydzy, 16g wazon<sup>-1</sup>). Zaobserwowano ponadto, że zwiększanie dawki popiołu z rdzeni kolb kukurydzy wpłynęło na wzrost stężenia cukrów redukujących, zwłaszcza statystycznie istotnie w zakresie od 8g do 16g wazon<sup>-1</sup>. Takiej korelacji nie obserwowano w przypadku ziarna otrzymanego z upraw, do nawożenia których stosowano wzrastające dawki popiołów ze zrębków drewna, jak i biomasy i wapna defekacyjnego. Porównując skrobiowość i zawartość cukrów redukujących w badanych próbkach ziarna żyta, można zaobserwować nieco niższą skrobiowość ziarna z upraw nawożonych popiołami ze spalania biomasy w odniesieniu do danych literaturowych dotyczących ziarna z upraw tradycyjnych z udziałem nawozów mineralnych (Balcerek, i in., 2016).

**Tabela 16.** Skład chemiczny ziarna żyta.

<b>Obiekt</b>	<b>Dawka (g wazon<sup>-1</sup>)</b>	<b>Skrobiowość (g/100 g)</b>	<b>Cukry redukujące (g/100 g)</b>
<b>Kontrola</b>	0	57,122 abc	1,220 ab
<b>Popiół kukurydza</b>	8	55,901 bcd	0,865 ef
	16	55,199 bcd	1,152 abc
	32	56,337 abcd	1,286 a
<b>Popiół zrębka</b>	8	57,826 ab	0,962 def
	16	59,523 a	1,109 bcd
	32	58,409 ab	1,019 cde
<b>Wapno</b>	8	58,514 ab	0,933 ef
	16	56,900 abc	0,861 ef
	32	57,095 abc	1,014 cde
<b>Popiół Mix</b>	8	54,119 cd	0,824 f
	16	55,572 bcd	1,115 bcd
	32	58,010 ab	0,885 ef
<b>Popiół kukurydza + wapno</b>	8	56,812 abc	1,112 bcd
	16	55,635 bcd	0,940 ef
	32	53,033 d	0,962 def

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

### **Charakterystyka zacierów słodkich:**

Przeprowadzono analizę składu jakościowo-ilościowego cukrów w mieszaninie śruty zbożowej z wodą przed procesem zacierania oraz po zacieraniu z udziałem enzymów amylolitycznych HPLC (tabela 32). W największych stężeniach występowała glukoza (cukier prosty – monosacharyd), następnie maltotrioza (trisacharyd złożony z 3 cząsteczek glukozy) i maltoza (disacharyd złożony z 2 cząsteczek glukozy). Ponadto odnotowano obecność ksylozy (pentozy), która nie jest fermentowana przez drożdże gorzelnicze. Sumarycznie, największą zawartość cukrów redukujących przed procesem zacierania oznaczono w mieszaninie sporządzonej z ziarna żyta z uprawy nawożonej popiołem z rdzeni kolb kukurydzy w dawce 32g wazon<sup>-1</sup>.

Po przeprowadzeniu procesu zacierania skrobi, we wszystkich próbkach odnotowano istotny wzrost stężenia cukrów fermentujących, tj. glukozy, maltozy i maltotriozy jak efekt hydrolizy skrobi przez enzymy amylolityczne. Zawartość ekstraktu ogólnego wyrażanego w stopniach Ballinga, na który składają się głównie obecne w nim cukry, ale także inne rozpuszczalne składniki niecukrowe (np. związki azotowe, sole mineralne), wynosiła od 15,68 °Błg w próbce z udziałem ziarna żyta z uprawy nawożonej poprzez dodatek popiołu z rdzeni kolb kukurydzy 50% + biomasa i wapno defekacyjne 50% (32g wazon<sup>-1</sup>) do 17,72 °Błg dla próbek z udziałem osadki kukurydzy 32g wazon<sup>-1</sup>.

Z uwagi na to, że proces zacierania, składający się z etapu upłynniania/dekstrynizacji i następnie scukrzania nie był prowadzony z wydzielonym etapem scukrzania (zastosowano preferowaną w gorzelnictwie strategię jednoczesnego scukrzania i fermentacji, ang. SSF (*simultaneous saccharification and fermentation*)), w badanych zacierach w relatywnie wysokich stężeniach występowały maltoza, maltotrioza oraz niezhydrolizowane fragmenty skrobi, czyli dekstryny. Należy jednak pamiętać, że enzymy amylolityczne wykazują aktywność także podczas fermentacji, co zapewnia efektywną hydrolizę dekstryn i fermentację powstałych cukrów przez drożdże.

Mimo statystycznie istotnych różnic w zawartości cukrów redukujących i dekstryn w ocenianych zacierach, nie można na tym etapie badań jednoznacznie ocenić wpływu rodzaju popiołów użytych do nawożenia upraw na efektywność hydrolizy skrobi

**Tabela 17.** Skład zacierów słodkich.

Obiekt	Dawka (g wazon <sup>-1</sup> )	Przed etapem zacierania					Po zacieraniu (zacier słodki)							
		Maltoza (g/L)	Maltotrioza( g/L)	Glukoza (g/L)	Ksyloza (g/L)	Cukry redukujące ogółem (g glukozy/L)	Ekstrakt zacieru (°Błg)	Maltotrioza (g/L)	Maltoza (g/L)	Glukoza (g/L)	Ksyloza (g/L)	Cukry redukując (g glukozy/L)	Cukry ogółem po hydrolizie (g glukozy/L)	Dekstryny (g/L)
<b>Kontrola</b>	0	0,668 cd	1,201 b	1,314 b	0,854 cde	3,297 ab	16,87 bed	15,627 a	42,748 abcd	16,204 de	1,526 cde	78,005 cd	174,835 abc	87,147 abcd
<b>Popiół kukurydza</b>	8	0,690 cd	0,614 gh	0,951 d	0,685 g	2,339 f	17,33 abc	14,836 abc	42,490 abcd	12,499 e	1,462 de	73,178 cd	170,210 bed	87,329 abcd
	16	0,666 cd	1,074 bc	1,268 b	0,858 cde	3,114 abc	16,83 bed	12,353 bcd	46,295 abc	19,603 bcde	1,702 bcde	81,617 bc	168,877 bed	78,533 bcde
	32	0,198 h	1,493 a	1,717 a	1,312 a	3,501 a	17,72 a	15,598 a	42,015 abcd	11,749 e	1,218 e	72,747 cd	174,135 abc	91,249 abc
<b>Popiół zrębka</b>	8	0,685 cd	0,835 cdefg	0,984 d	0,712 fg	2,599 def	17,37 abc	13,611 abc	47,439 a	20,347 bcde	1,948 bed	84,918 bc	176,250 ab	82,199 bed
	16	0,156 h	1,162 b	1,602 a	1,218 a	2,993 bcd	17,48 ab	16,271 a	41,711 abcd	18,100 cde	1,210 e	79,503 bc	182,500 a	92,698 ab
	32	0,824 a	0,772 defgh	1,055 cd	0,757 efg	2,753 cde	17,37 abc	11,808 cd	34,516 cd	25,701 bc	2,120 abc	74,730 cd	178,156 ab	93,083 ab
<b>Wapno</b>	8	0,533 g	0,891 cdef	1,010 cd	0,945 bc	2,521 ef	17,37 abc	16,193 a	48,280 a	19,421 bcde	1,793 bcde	87,654 abc	178,240 ab	81,527 bed
	16	0,584 fg	0,687 efgh	0,975 d	0,667 g	2,326 f	16,80 bed	13,761 abc	50,800 a	35,040 a	2,644 a	103,310 a	173,196 abc	62,897 e
	32	0,852 a	0,760 defgh	1,024 cd	0,833 cdef	2,740 cde	17,38 abc	14,047 abc	51,103 a	17,097 cde	1,737 bcde	85,995 bc	174,196 abc	79,381 bcde
<b>Popiół Mix</b>	8	0,597 ef	0,581 h	0,973 d	0,739 efg	2,227 f	16,63 cd	12,250 bcd	35,481 bcd	21,674 bed	1,827 bcde	72,195 cd	164,746 cd	83,295 abcd
	16	0,766 b	0,968 bcd	1,171 bc	0,845 cde	3,013 bc	17,03 abcd	14,037 abc	47,219 ab	14,569 de	1,416 de	79,367 bc	169,896 bed	81,477 bed
	32	0,589 fg	0,660 fgh	1,063 cd	0,701 g	2,391 ef	17,08 abcd	14,980 ab	48,414 a	27,954 ab	2,315 ab	95,024 ab	176,596 ab	73,415 cde
<b>Popiół kukurydza + wapno</b>	8	0,720 bc	0,905 cde	1,279 b	0,889 bcd	3,006 bc	16,53 d	10,354 d	33,781 d	15,009 de	1,278 e	61,702 d	173,613 abc	100,720 a
	16	0,562 fg	0,823 defg	1,070 cd	0,998 b	2,541 ef	17,37 abc	16,408 a	44,323 abcd	15,100 de	1,594 cde	79,400 bc	169,613 bed	81,192 bed
	32	0,649 de	0,820 defgh	1,039 cd	0,771 defg	2,600 def	15,68 e	15,059 ab	43,548 abcd	19,648 bcde	1,841 bcde	81,680 bc	161,858 d	72,160 de

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

### **Charakterystyka zacierów odfermentowanych i wskaźniki fermentacji:**

Przygotowane zaciery słodkie poddano fermentacji, a po zakończeniu procesu przeprowadzono analizę fizyko-chemiczną zacierów odfermentowanych obejmującą parametry takie jak: pH, zawartość cukrów tzw. resztkowych, etanolu oraz produktów ubocznych fermentacji co zostało przedstawione w tabeli 29.

W zacierach odfermentowanych oznaczano zawartość cukrów nieodfermentowanych, etanolu i ubocznych metabolitów fermentacji (kwasu bursztynowego, kwasu mlekowego, kwasu octowego i glicerolu) z wykorzystaniem metody HPLC. Na podstawie uzyskanych wyników HPLC dokonano obliczenia wskaźników fermentacji, tj. wykorzystania cukrów i wydajności fermentacji wyrażonej w % wydajności teoretycznej. Do analizy związków lotnych w zacierach odfermentowanych wykorzystano metodę chromatografii gazowej ze spektrometrią mas, z zastosowaniem techniki statycznej analizy fazy nadpowierzchniowej (HS-GC-MS), (Pielech-Przybylska, i in., 2022). Wyniki badań przedstawiono w postaci: wartość średnia ( $\bar{x}$ )  $\pm$  odchylenie standardowe (SD).

Zawartość ekstraktu pozostałego w zacierach odfermentowanych wynosiła od 0,65 do 1.26 °Błg, co wskazuje na wykorzystanie zdecydowanej większości składników wchodzących w jego skład. Z kolei oceniając zmiany pH, które przed fermentacją zostało ustalone na poziomie 4,8, po zakończeniu fermentacji mieściło się w przedziale od 3,88 w próbce kontrolnej do 4,25 w próbce zacieru pochodzącego z ziarna z uprawy z dodatkiem popiołu z rdzeni kolb kukurydzy 50% + biomasa i wapno defekacyjne 50% (16 g wazon<sup>-1</sup>).

Spadek pH podczas fermentacji jest wynikiem produkcji kwasów, m.in. mlekowego, octowego. Zbyt niskie pH (<4) może wskazywać na rozwój zakażeń mikrobiologicznych. Mimo statystycznie istotnych różnic w pH zacierów odfermentowanych i relatywnie niskiego pH próbki kontrolnej, można uznać, że proces fermentacji przygotowanych zacierów żytnich przebiegał raczej bez zakłóceń (Russell, 2003).

Oceniając skład jakościowo-ilościowy cukrów w zacierach odfermentowanych, można zauważyć bardzo wysoki stopień obniżenia ich stężeń w odniesieniu do zacierów słodkich. W najniższych stężeniach występowała glukoza (we wszystkich próbach zacierów na poziomie poniżej 0,022 g/L). Jest to cukier preferowany przez drożdże. Zawartość maltozy była poniżej ok. 2 g/L, a maltotriozy poniżej ok. 1,5 g/L. Są to cukry także fermentowane przez drożdże, po wykorzystaniu glukozy. W konsekwencji wykorzystanie cukrów, czyli stopień odfermentowania badanych zacierów był bardzo wysoki

i w zdecydowanej większości prób wynosił ponad 98%. Jedyne próba zacieru z ziarna żyta nawożonego popiołem z rdzeni kolb kukurydzy 50% + biomasa i wapno defekacyjne 50% (32g wazon<sup>-1</sup>) charakteryzowała się relatywnie istotnie niższym, jakkolwiek także wysokim stopniem odfermentowania na poziomie 96,34% co obrazuje poniższa tabela.

**Tabela 18.** Ekstrakt i pH zacierów odfermentowanych.

Obiekt	Dawka (g wazon <sup>-1</sup> )	Ekstrakt [°Blg]	SD	pH	SD
<b>Kontrola</b>	0	0,65 b	0,05	3,88 gh	0,01
<b>Popiół kukurydza</b>	8	0,67 b	0,16	4,14 abcd	0,07
	16	0,82 b	0,07	4,13 bcd	0,06
	32	0,69 b	0,01	4,06 cdef	0,01
<b>Popiół zrębka</b>	8	0,89 b	0,04	4,30 a	0,15
	16	0,78 b	0,02	4,04 cdefg	0,04
	32	0,81 b	0,07	4,09 bcde	0,01
<b>Wapno</b>	8	0,63 b	0,05	3,81 h	0,01
	16	0,66 b	0,04	3,92 fgh	0,19
	32	0,77 b	0,05	4,18 abc	0,05
<b>Popiół Mix</b>	8	0,91 b	0,07	4,20 abc	0,02
	16	0,81 b	0,06	3,99 defg	0,06
	32	0,72 b	0,04	4,10 bcde	0,04
<b>Popiół kukurydza + wapno</b>	8	0,67 b	0,08	4,11 bcde	0,02
	16	0,81 b	0,09	4,25 ab	0,02
	32	1,26 a	0,52	3,95 efgh	0,17

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

W zacierach odfermentowanych odnotowano także obecność metabolitów fermentacji, takich jak nietlotny kwas bursztynowy (od 1,129 do 1,280 g/L) – nie przechodzi do destylatu, lotny kwas octowy (od 0,017 do 0,041 g/L) oraz glicerol (od 6,003 do 6,683 g/L). Glicerol jest jednym z produktów metabolizmu drożdży, którego główną funkcją jest zapewnienie drożdżom ochrony przed stresem środowiskowym (Yalcin, Yesim, 2008).

Z gorzelniczego punktu widzenia, najważniejszym wskaźnikiem jest wydajność etanolu liczona na podstawie jego stężenia oznaczonego w zacierach słodkich. W ocenianych zacierach odfermentowanych najwyższe stężenie etanolu (68,122 g/L) oznaczono w zacierze z ziarna po nawożeniu popiołem z osadki kukurydzy (32g wazon<sup>-1</sup>). Jednakże porównywalne, bez statystycznie istotnych różnic, wyniki uzyskano także dla prób z mniejszą dawką tego popiołu, jak i innych. Najniższe stężenie etanolu (55,549 g/L), istotnie odbiegające od pozostałych oznaczono w próbie ziarna z uprawy nawożonej popiołem z rdzeni kolb kukurydzy 50% + Biomasa i wapno defekacyjne 50% (32g wazon<sup>-1</sup>). Dokonano oceny wydajności fermentacji w stosunku do wszystkich cukrów obecnych w zacierze oraz w stosunku do cukrów wykorzystanych podczas fermentacji. W przypadku metody obliczania tego wskaźnika w odniesieniu do cukrów wykorzystanych wskaźnik ten był nieco wyższy, jednak niezależnie od metod obliczeń obserwowano analogiczne tendencje. Najwyższą wartość, powyżej 77% wydajności teoretycznej, wskaźnik ten osiągnął w próbkach zacierów z ziarna roślin żyta nawożonych popiołem pochodzącym z rdzeni kolb kukurydzy (niezależnie od dawki) oraz popiołem z biomasy i wapna defekacyjnego (32g wazon<sup>-1</sup>). Nieco niższe wydajności, ale bez statystycznie istotnych różnic w odniesieniu do próbki wyżej wymienionej, odnotowano dla roślin nawożonych pozostałymi popiołami z wyjątkiem obiektów nawożonych popiołami z rdzeni kolb kukurydzy 25% + zrębki dREW. 75%, (32g wazon<sup>-1</sup>) (wydajność 71,69% wydajności teoretycznej), osadki kukurydzy 50% + biomasa i wapno defekacyjne 50%, (8g wazon<sup>-1</sup>) (71,10% wydajności teoretycznej) oraz w próbie kontrolnej (71,89%). Zdecydowanie odbiegającą pod względem wydajności była próbka zacieru z ziarna z uprawy nawożonej popiołem z rdzeni kolb kukurydzy 50% + biomasa i wapno defekacyjne 50%, (32g wazon<sup>-1</sup>) (67,25%). Wskazane byłoby przeprowadzenie dalszych badań w celu wykluczenia bądź potwierdzenia obecności czynników hamujących przebieg fermentacji przy takiej dawce wspomnianego popiołu. Najlepsza pod względem wydajności fermentacji była w tym przypadku dawka (16g wazon<sup>-1</sup>). Odnotowane wydajności fermentacji są w większości badanych próbek zbliżone do cytowanych w literaturze (Pietruszka, Szopa, 2014).

Oceniając efektywność fermentacji ziarna żyta pochodzącego z upraw nawożonych popiołami ze spalania różnego rodzaju biomasy i wapna defekacyjnego, można wnioskować o możliwości potencjalnego zagospodarowania biomasy odpadowej do produkcji popiołów jako źródła makro- i mikroelementów niezbędnych do prawidłowego wzrostu zbóż, m.in. żyta i wykorzystania uzyskanego ziarna do wydajnej produkcji etanolu.

**Tabela 19.** Skład zacierów odfermentowanych.

Obiekt	Dawka (g wazon-1)	Maltioza (g/L)	Maltoza (g/L)	Glukoza (g/L)	Ksyloza (g/L)	Arabinoza (g/L)	Kwas bursztynowy (g/L)	Glicerol (g/L)	Kwas octowy (g/L)	Etanol (g/L)	Cukry ogółem (g glukozy L)	Stopień odfermentowania cukrów ogółem (%)	Wydajność cukry ogółem (% wyd. teoretycznej)	Wydajność, wykorzystane (% wyd. teoretycznej)
<b>Kontrola</b>	0	1,163 j	0,875 ef	0,021 b	0,584 b	0,066 fg	1,129 cd	6,003 ef	0,041 ab	64,287 ab	2,192 c	98,75 a	71,89 abcd	72,80 bcde
<b>Popiół kukurydza</b>	8	1,568 abc	1,091 cde	0,012 b	0,741 b	0,080 bcde	1,280 a	6,887 a	0,021 cde	66,041 ab	2,847 bc	98,33 ab	75,91 ab	77,20 ab
	16	1,546 abcd	1,357 bcd	0,015 b	0,564 b	0,090 ab	1,141 bcd	6,197 cdef	0,034 abcde	65,354 ab	3,106 bc	98,16 ab	75,77 ab	77,20 ab
	32	1,628 a	0,797 ef	0,008 b	0,585 b	0,077 cde	1,193 abc	6,382 bcde	0,034 abcde	68,122 a	2,597 bc	98,51 ab	76,59 a	77,75 a
<b>Popiół zrębka</b>	8	1,407 defg	1,458 bc	0,009 b	0,420 b	0,088 abc	1,073 d	6,868 a	0,038 abc	65,706 ab	3,057 bc	98,27 ab	72,99 abc	74,28 abcde
	16	1,524 abcde	0,948 de	0,013 b	0,557 b	0,091 ab	1,187 abc	6,334 bcde	0,020 de	67,065 ab	2,649 bc	98,55 ab	71,93 abcd	72,99 abcde
	32	1,464 bcde	0,989 de	0,022 b	0,610 b	0,090 ab	1,166 bcd	6,344 bcde	0,035 abcd	67,563 a	2,637 bc	98,52 ab	74,26 abc	75,38 abcd
<b>Wapno</b>	8	1,262 hij	0,823 ef	0,022 b	0,605 b	0,070 ef	1,153 bcd	5,784 f	0,028 abcde	63,327 b	2,245 bc	98,74 a	69,68 cd	70,57 de
	16	1,276 ghij	1,028 de	0,020 b	0,584 b	0,093 a	1,162 bcd	6,463 abcd	0,039 ab	66,925 ab	2,473 bc	98,57 ab	75,62 ab	76,71 abc
	32	1,595 ab	1,122 cde	0,014 b	0,651 b	0,094 a	1,245 ab	6,683 ab	0,032 abcde	67,720 a	2,911 bc	98,33 ab	76,07 ab	77,37 ab
<b>Popiół Mix</b>	8	1,479 bcde	1,103 cde	0,013 b	0,611 b	0,088 abc	1,171 bcd	6,293 bcde	0,028 abcde	63,048 b	2,765 bc	98,32 ab	74,99 ab	76,28 abc
	16	1,398 efgh	2,064 a	0,010 b	0,689 b	0,083 abcd	1,179 abcd	6,485 abc	0,017 e	64,459 ab	3,686 b	97,83 b	74,24 abc	75,88 abc
	32	1,160 j	0,955 de	0,020 b	0,578 b	0,086 abcd	1,156 bcd	6,172 cdef	0,030 abcde	64,708 ab	2,273 bc	98,71 a	71,69 abcd	72,63 bcde
<b>Popiół kukurydza + wapno</b>	8	1,445 cdef	0,907 e	0,016 b	0,619 b	0,066 fg	1,129 cd	6,099 cdef	0,027 bcde	63,091 b	2,524 bc	98,55 ab	71,10 bcd	72,15 cde
	16	1,320 fgghi	0,478 f	0,036 b	0,435 b	0,076 def	1,130 cd	6,075 cdef	0,046 a	65,920 ab	1,958 c	98,84 a	76,01 ab	76,90 abc
	32	1,182 ij	1,569 b	3,074 a	1,798 a	0,058 g	1,171 bcd	6,022 def	0,032 abcde	55,549 c	5,996 a	96,34 c	67,25 d	69,77 e

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

## **7.6. Ocena wpływu nawożenia popiołami na uprawę żyta i na zawartość lotnych związków w zacierach odfermentowanych.**

Profil lotnych związków powstających podczas fermentacji zacieru gorzelniczego jest kluczowy dla cech sensorycznych końcowego produktu. W trakcie fermentacji drożdże syntetyzują liczne związki lotne – m.in. związki karbonylowe (aldehydy i ketony), alkohole wyższe oraz estry etylowe i octanowe – które determinują smak i aromat napojów spirytusowych. Podczas tego badania przeanalizowano, jak wpływa wzbogacania gleby popiołem ze spalania biomasy roślinnej na stężenia lotnych związków w zacierach odfermentowanych.

W celu oznaczenia zawartości lotnych związków zacieru poddano analizie metodą chromatografii gazowej (GC) sprzężonej ze spektrometrią mas (MS), z zastosowaniem techniki analizy fazy nadpowierzchniowej (HS).

Uzyskane wyniki stężeń poszczególnych związków w każdej próbce (kontrola oraz próbek poddanych badaniom w różnych dawkach i konfiguracjach) poddano analizie wariancji (ANOVA). Istotność statystyczną różnic między średnimi oceniano na poziomie istotności  $p < 0,05$ .

Przeprowadzona analiza ANOVA wykazała, że większość lotnych związków aromatycznych występowała w zacierach z żyta nawożonego substancjami odpadowymi na poziomach zbliżonych do próbki kontrolnej z nawozem mineralnym. Tylko w nielicznych przypadkach stwierdzono statystycznie istotne różnice stężeń ( $p < 0,05$ ) pomiędzy poszczególnymi wariantami nawożenia a kontrolą.

Poniżej przedstawiono porównanie stężeń wybranych lotnych związków w zacierach z poszczególnych obiektów doświadczenia, uwzględniając istotne różnice względem kontroli.

Tabela 20. Lotne związki w zacierach odfermetowanych – część 1.

Obiekt	Dawka (g wazon-1)	2-Metylo- maślan etylu (µg/L)	1- Heksanol (µg/L)	Furfural	1- Oktanol (µg/L)	Propionian etylu (µg/L)	Acetal dietylowy aldehydu octowego (µg/L)	Izomaślan etylu (µg/L)	Octan izobutyłu (µg/L)	Maślan etylu (µg/L)	Izowalerian etylu (µg/L)	Octan 3- metylobutyłu (µg/L)	Octan 2- metylobutyłu (µg/L)
Kontrola	0	0,7	80,1 abc	16,7 bc	4,5	46,8 a	13,1 abcd	6,0 ab	9,9 ab	5,2 ab	0,2 bcd	41,0 ab	9,8 abc
Popiół kukurydza	8	0,6	93,2 abc	22,9 abc	4,1	39,7 ab	7,9 cd	5,4 abc	5,5 bc	4,1 ab	0,3 ab	27,8 bc	5,1 cd
	16	0,6	86,5 abc	21,6 abc	5,8	33,9 ab	9,1 cd	4,6 abcd	8,4 abc	4,4 ab	0,2 cde	35,5 ab	8,2 abcd
	32	0,6	107,2 ab	27,5 a	5,9	41,6 ab	21,0 a	5,5 abc	9,4 ab	5,4 a	0,3 a	41,7 ab	9,5 abc
Popiół zrębka	8	0,5	64,5 c	21,3 abc	4,0	29,2 b	12,1 bcd	4,1 bcd	6,1 bc	3,7 abc	0,2 cde	30,5 abc	6,3 bcd
	16	0,6	121,5 a	26,6 ab	6,1	38,0 ab	19,0 ab	4,9 abc	9,1 ab	4,7 ab	0,2 bcd	36,9 ab	9,0 abc
	32	0,4	93,5 abc	23,6 abc	4,8	33,3 ab	13,9 abcd	4,3 bcd	7,6 abc	4,1 ab	0,2 cde	32,2 abc	7,4 abcd
Wapno	8	0,7	71,3 bc	19,5 abc	5,5	44,5 ab	6,8 cd	6,4 a	8,6 abc	5,0 ab	0,2 abc	38,0 ab	8,8 abc
	16	0,5	73,2 bc	16,4 bc	4,8	41,5 ab	15,0 abc	6,1 ab	11,7 a	5,4 a	0,2 cde	47,7 a	11,5 a
	32	0,5	85,4 abc	22,3 abc	5,5	43,5 ab	19,1 ab	5,2 abc	8,3 abc	4,8 ab	0,2 bcd	36,0 ab	8,1 abcd
Popiół Mix	8	0,6	89,6 abc	19,6 abc	4,8	30,8 b	6,2 d	4,1 bcd	6,0 bc	3,4 bc	0,2 cde	25,2 bc	5,7 bcd
	16	0,6	75,7 bc	23,6 abc	3,7	40,1 ab	7,2 cd	3,8 cd	5,0 bc	3,5 bc	0,2 cde	27,4 bc	5,4 bcd
	32	0,5	75,2 bc	14,7 c	4,2	35,5 ab	11,4 bcd	4,7 abc	8,3 abc	3,9 ab	0,2 de	32,9 abc	8,0 abcd
Popiół kukurydza + wapno	8	0,6	110,4 ab	17,0 bc	4,2	38,6 ab	7,8 cd	4,9 abc	7,4 abc	4,1 ab	0,2 abcd	32,8 abc	7,5 abcd
	16	0,6	78,1 bc	19,0 abc	4,7	36,7 ab	9,3 cd	6,4 a	10,0 ab	5,0 ab	0,2 bcd	41,9 ab	10,2 ab
	32	0,4	100,5 abc	22,8 abc	4,7	32,3 ab	9,1 cd	2,5 d	3,6 c	2,2 c	0,1 e	16,2 c	3,3 d

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

**Tabela 21.** Lotne związki w zacierach odfermetowanych – część 2.

Obiekt	Dawka (g wazon-1)	Aldehyd octowy (mg/L)	Aceton (mg/L)	Metanol (mg/L)	1-Propanol (mg/L)	Heksanal (mg/L)	1-Butanol (mg/L)	Octan etylu (mg/L)	2-Metylo-1-propanol (mg/L)	3-Metylo-1-butanol (mg/L)	2-Metylo-1-butanol (mg/L)	Aldehyd izomasłowy (µg/L)
<b>Kontrola</b>	0	3,28 b	0,14	1,984 bc	7,72 ab	0,70 ab	0,31 a	3,81 abc	110,16 a	92,69 cde	43,19 ab	39,9 bc
<b>Popiół kukurydza</b>	8	1,97 b	0,10	2,27 abc	6,76 ab	0,59 ab	0,31 a	3,30 abc	110,54 a	112,80 a	46,91 ab	23,7 c
	16	2,59 b	0,14	2,62 a	8,53 a	0,81 a	0,32 a	2,76 abc	116,26 a	100,74 abcd	45,01 ab	36,1 bc
	32	3,15 b	0,11	2,11 abc	8,08 a	0,70 ab	0,33 a	3,08 abc	122,85 a	108,62 ab	49,10 a	33,0 bc
<b>Popiół zrębka</b>	8	3,62 ab	0,13	2,19 abc	7,87 ab	0,65 ab	0,33 a	2,51 bc	91,05 ab	95,13 bcde	38,99 bc	36,7 bc
	16	3,69 ab	0,14	2,25 abc	8,07 a	0,76 a	0,35 a	2,69 abc	119,64 a	101,64 abc	47,37 ab	51,0 ab
	32	3,03 b	0,12	2,03 abc	7,49 ab	0,67 ab	0,36 a	2,74 abc	108,94 a	102,05 abc	45,45 ab	34,8 bc
<b>Wapno</b>	8	1,78 b	0,12	2,06 abc	8,77 a	0,70 ab	0,30 a	3,96 a	123,36 a	102,49 abc	49,31 a	22,88 c
	16	3,00 b	0,13	1,959 bc	7,47 ab	0,65 ab	0,26 a	3,59 abc	108,35 ab	86,93 de	40,71 abc	36,6 bc
	32	3,44 b	0,12	2,33 ab	8,85 a	0,75 a	0,35 a	3,23 abc	114,32 a	108,29 ab	47,24 ab	45,1 abc
<b>Popiół Mix</b>	8	2,49 b	0,12	2,11 abc	6,80 ab	0,70 ab	0,27 a	2,22 c	103,55 ab	93,04 cde	41,99 abc	38,2 bc
	16	2,41 b	0,12	2,22 abc	6,51 ab	0,58 ab	0,29 a	2,93 abc	83,32 ab	97,55 bcde	38,87 bc	29,6 bc
	32	2,80 b	0,12	1,70 c	6,80 ab	0,67 ab	0,30 a	2,83 abc	101,89 ab	85,99 e	40,22 abc	40,3 bc
<b>Popiół kukurydza + wapno</b>	8	2,29 b	0,12	2,14 abc	7,87 ab	0,72 ab	0,27 a	2,73 abc	107,35 ab	92,07 cde	42,32 abc	29,7 bc
	16	2,42 b	0,11	1,985 bc	8,79 a	0,767 a	0,27 a	3,36 abc	125,01 a	93,58 cde	45,95 ab	25,5 bc
	32	6,98 a	0,12	1,94 bc	4,97 b	0,47 b	0,25 a	2,31 c	65,02 b	90,85 cde	33,58 c	70,5 a

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

**Tabela 22.** Lotne związki w zacierach odfermetowanych – część 3.

Obiekt	Dawka (g wazon <sup>-1</sup> )	Mrówczan etylu (µg/L)	Aldehyd 2-metylomastłowy (µg/L)	Aldehyd izowalerianowy (µg/L)	Diacetyl (µg/L)	Heksanian etylu (µg/L)	Oktanian etylu (µg/L)	Nonanian etylu (µg/L)	Dekanian etylu (µg/L)	Dodekanian etylu (µg/L)	Walerian etylu (µg/L)
<b>Kontrola</b>	0	157,2 a	4,2 b	9,1 b	26,6 c	10,2 bc	1,3 cd	0,1 e	1,0 cde	0,2 efg	1,4 abc
<b>Popiół kukurydza</b>	8	72,6 bc	2,5 b	6,5 b	55,4 c	11,1 abc	1,2 cd	0,1 de	1,0 cde	0,4 cd	1,7 ab
	16	126,3 abc	3,6 b	9,2 b	44,2 c	13,1 abc	1,9 cd	0,1 e	1,1 cde	0,3 efg	1,3 bcd
	32	145,4 ab	3,9 b	9,9 b	33,9 c	16,9 a	4,4 a	0,4 a	2,6 a	0,8 a	1,7 a
<b>Popiół zrębka</b>	8	148,6 ab	4,1 b	9,2 b	392,5 a	11,5 abc	1,6 cd	0,1 cde	1,0 cde	0,3 de	1,2 cd
	16	159,6 a	5,8 ab	11,2 ab	36,1 c	14,2 ab	3,3 ab	0,3 b	2,0 ab	0,6 b	1,5 abc
	32	136,5 abc	3,7 b	8,1 b	35,0 c	15,1 ab	2,0 bcd	0,2 cd	1,3 cd	0,4 cd	1,3 abcd
<b>Wapno</b>	8	73,9 bc	2,7 b	5,5 b	36,9 c	11,8 abc	1,3 cd	0,1 e	0,8 de	0,2 fg	1,5 abc
	16	131,0 abc	3,8 b	7,9 b	23,3 c	10,8 bc	1,3 cd	0,1 e	0,9 de	0,2 efg	1,3 bcd
	32	108,4 abc	4,9 b	11,7 ab	40,3 c	14,4 ab	2,5 bc	0,2 c	1,6 bc	0,5 c	1,4 abc
<b>Popiół Mix</b>	8	97,9 abc	4,0 b	9,1 b	46,5 c	10,1 bc	2,2 bcd	0,1 de	1,2 cde	0,3 def	1,1 cde
	16	95,9 abc	3,4 b	7,3 b	52,5 c	14,6 ab	1,5 cd	0,1 e	0,8 de	0,3 efg	1,3 abcd
	32	106,7 abc	3,9 b	8,0 b	22,7 c	7,7 c	1,1 d	0,1 e	0,8 de	0,2 fg	0,9 de
<b>Popiół kukurydza + wapno</b>	8	137,8 abc	2,9 b	6,6 b	29,7 c	7,6 c	1,0 d	0,1 e	0,8 de	0,2 efg	1,3 cd
	16	92,6 abc	3,1 b	5,7 b	74,2 bc	9,4 bc	1,4 cd	0,1 e	0,8 de	0,2 g	1,2 cd
	32	58,0 c	10,8 a	19,6 a	262,5 ab	13,4 abc	1,2 cd	0,1 e	0,7 e	0,2 efg	0,7 e

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Aldehyd octowy (etanal) – to kluczowy związek karbonylowy ściśle limitowany rozporządzeniem UE w alkoholu etylowym rolniczym, z uwagi na jego toksyczność. W próbie kontrolnej jego stężenie wynosiło około 3,28 mg/L. Większość zacierów otrzymanych z żyta nawożonego badanymi popiołami miała porównywalny z próbą kontrolną poziom aldehydu octowego w zakresie od 1,97 do 3,15 mg/L. Jedynie zacier z żyta nawożonego mieszanką popiołów z rdzeni kolb kukurydzy oraz biomasy i wapna defekacyjnego w najwyższej dawce (32g wazon-1) zawierał dwukrotnie wyższe stężenie aldehydu octowego w porównaniu większości próbek, w tym kontroli (6,98 mg/L,  $p < 0,05$ ). Zawartość pozostałych aldehydów, tj. heksanal, aldehydu izomasłowego, aldehydu 2-metylomasłowego oraz aldehydu izowalerianowego mieściła się w zakresie od 0,56 do 0,85 mg/L. Próbką, w której oznaczono najwyższe stężenie ww. aldehydów był zacier otrzymanych z żyta nawożonego mieszanką popiołów z rdzeni kolb kukurydzy i biomasy z wapnem defekacyjnym w najwyższej dawce (32g wazon-1). Odnotowane różnice dotyczyły zarówno z innymi wariantami nawożenia, jak również z próbką kontrolną.

Furfural to również przedstawiciel aldehydów, a dokładniej aldehyd furanowy, który tak jak aldehyd octowy jest limitowany w alkoholu etylowym rolniczym. Jego obecność jest determinowana przede wszystkim obróbką termiczną surowców skrobiowych, zatem skład surowca może istotnie wpływać na jego stężenie w zacierach, a tym samym w otrzymanych spirytusach. Stężenia furfuralu w badanych próbach zacierów odfermentowanych były niskie w zakresie od 14,7 do 26,6  $\mu\text{g/L}$  i nie różniły się istotnie pomiędzy sobą ( $p > 0,05$ ). Brak różnic sugeruje, że zastosowanie nawożenia badanymi popiołami nie wpływa na powstawanie furfuralu podczas obróbki cieplnej ziaren żyta.

Octan etylu (ester etylowy kwasu octowego) – jest dominującym ilościowo związkiem spośród wszystkich estrów syntetyzowanych przez drożdże. Charakteryzuje się owocowym aromatem, przy czym przy wyższych stężeniach odbierany jest jako zapach rozpuszczalnikowy. Jego stężenie w analizowanych zacierach pozostawało na zbliżonym, stosunkowo niskim poziomie. Nie wykazano natomiast istotnych różnic w stężeniu octanu etylu w badanych próbach w porównaniu do próbki kontrolnej. Oprócz octanu etylu w badanych zacierach odfermentowanych oznaczono również estry octanowe wyższych alkoholi oraz estry etylowe wyższych kwasów tłuszczowych, przy czym ich stężenie różniło się w zależności od związku, ponieważ mrówczan etylu, propionian etylu oraz octan 3-metylobutyłu oznaczono w zakresie odpowiednio 58,0-137,8  $\mu\text{g/L}$ , 29,2-46,8  $\mu\text{g/L}$  i 16,2-47,7  $\mu\text{g/L}$ , natomiast pozostałe estry, takie jak izomaślan etylu, maślan etylu, octan butylu,

izowalerian etylu, walerian etylu, octan 2-metylobutyłu, heksanian etylu, oktanian etylu, dekanian etylu i dodekanian etylu występowały w stężeniu poniżej 10 µg/L, a w przypadku estrów etylowych wyższych kwasów tłuszczowych nawet poniżej 1 µg/L. Niemniej, ze względu na niski próg wyczuwalności, nawet w tak niskim stężeniu estry zaliczane są do związków silnie aktywnych sensorycznie. W przeprowadzonych badaniach nie wykazano istotnych różnic, z kilkoma wyjątkami, między próbami badanymi a kontrolą.

Alkohole wyższe najczęściej reprezentowane są przez alkohol izoamyłowy (3-metylo-1-butanol), alkohol amyłowy optycznie czynny (2-metylo-1-butanol), alkohol izobutyłowy (2-metylo-1-propanol) oraz alkohol propylowy (1-propanol). Zawartość ww. związków, wyrażonych jako suma, wynosiła od 194,42 do 288,66 mg/L, przy czym w najwyższych stężeniach występował 3-metylo-1-butanol oraz 2-metylo-1-propanol.

Zastosowanie badanych popiołów nie zmieniło istotnie poziomu 1-propanolu, w porównaniu do kontroli. Statystycznie istotne różnice obserwowano w przypadku alkoholu izobutyłowego – w próbce zacieru otrzymanego z żyta nawożonego mieszanką popiołów z rdzeni kolb kukurydzy oraz biomasy i wapna defekacyjnego w dawce (32g wazon<sup>-1</sup>) oznaczono stężenie tego związku na niższym (o 40%) poziomie, w porównaniu do próby kontrolnej. Mimo tej różnicy, pozostałe warianty nawożenia popiołami dały stężenia izobutanolu zbliżone do kontroli.

Podsumowując zastosowanie popiołów nie spowodowało zasadniczych zmian w profilu lotnych związków w żytnich zacierach odfermentowanych, w porównaniu z nawożeniem mineralnym (kontrola). Zaobserwowane różnice statystycznie istotne dotyczyły tylko niektórych związków i dotyczyły przede wszystkim jednego wariantu, z zastosowaniem mieszaniny popiołów z rdzeni kolb kukurydzy i biomasy z wapnem defekacyjnym w najwyższej dawce (32g wazon<sup>-1</sup>). Z perspektywy technologii fermentacji i destylacji oznacza to, że nowatorskie, przyjazne środowisku nawożenie popiołami ze spalania produktów ubocznych z przemysłu rolno-spożywczego ma szansę znaleźć zastosowanie w uprawie surowców gorzelniczych bez pogorszenia charakterystyki aromatycznej otrzymywanych z nich produktów.

## 8. STWIERDZENIA I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Analiza najważniejszych pod względem energetycznym parametrów wybranych rodzajów biomasy, spełniających kryterium dostępności, pozwoliła stwierdzić, że najwyższą przydatność do procesu spalania wykazują zrębka drzewna oraz rdzenie kolb kukurydzy. Pestki ze śliwek oraz wysłodki z buraka cukrowego i wywar pogorzelniczny nie sprawdziły się z uwagi na, odpowiednio: nadmierną zawartość popiołu w tych pierwszych oraz nadmierną wilgotność i zbyt niską zawartość węgla w dwóch pozostałych typach biomasy.
2. Kluczowe dla zapewnienia stabilności procesu spalania i maksymalizacji efektywności energetycznej instalacji kogeneracyjnej jest stosowanie zaproponowanych w pracy algorytmów pozwalających na precyzyjne określenie proporcji mieszania strumienia biomasy, uwzględniających zmienną wilgotność poszczególnych komponentów. W praktyce przemysłowej zadanie to spełnia wdrożony w zakładzie automatyczny system przenoszenia biomasy.
3. Ustalenie ilościowego wpływu zastosowanej mieszanki biomasy na fluktuacje mocy cieplnej, stabilność płomienia i dynamikę tworzenia osadów oraz identyfikacja zakresów parametrów procesowych zapewniających optymalną efektywność spalania przy zachowaniu dopuszczalnych poziomów emisji pozwalają na wdrożenie zaawansowanego sterowania umożliwiającego modyfikacje w schematach podawania paliwa, sterowaniu powietrzem spalania oraz adaptację parametrów pracy kotła do zmiennych właściwości biopaliw.
4. Wykazano, że popioły ze spalania biomasy zrębek drzewna i rdzeni kolb kukurydzy nie przekraczają dopuszczalnych poziomów zawartości metali ciężkich, a zastosowane do nawożenia gleby poprawiają biodostępność składników mineralnych i działają plonotwórczo, w stopniu uzależnionym od rodzaju popiołu i stosowanej dawki nawozu. Dowiedziono, że zaproponowany sposób recyrkulacji popiołów niesie potencjał poprawy wydajności produkcji etanolu bez negatywnego wpływu na jego jakość.

## 9. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały, że możliwe jest wyeliminowanie paliw kopalnych na rzecz biomasy energetycznej w sektorze rolno-spożywczym, co istotnie przyczynia się do redukcji emisji netto dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) do atmosfery. Jak wskazuje dostępna literatura, biomasa wykorzystywana jako paliwo energetyczne uczestniczy w zamkniętym cyklu węglowym, gdzie ilość CO<sub>2</sub> emitowanego podczas spalania jest kompensowana przez pochłanianie tego gazu w procesie fotosyntezy roślin. Modele bilansu węglowego oraz pomiary emisji potwierdzają, że zastąpienie paliw kopalnych biomasą pozwala ograniczyć emisje gazów cieplarnianych, co wspiera zrównoważony rozwój i ochronę klimatu. Uzyskane w niniejszej pracy wyniki potwierdzają założenie, że stosowanie biomasy energetycznej w produkcji rolno-spożywczej sprzyja zachowaniu równowagi obiegu węgla w środowisku naturalnym.

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz analizy parametrów pracy kotła parowego w zakładzie Polmos Żyrardów stwierdzono, że zastosowanie optymalnej mieszaniny biomasy energetycznej, składającej się z około 80% zrębki drzewnej oraz 20% udziału biomasy roślinnej z przemysłu rolno - spożywczego, umożliwia utrzymanie stabilnych i powtarzalnych parametrów termodynamicznych pary wodnej tj. ciśnienia i temperatury. Analiza bilansu energetycznego oraz monitorowanie parametrów procesu spalania wykazały, że właściwie skomponowana mieszanka biomasy cechuje się stałą wartością opałową i jednorodnym profilem spalania, co przekłada się na minimalizację fluktuacji parametrów pary. Stabilność tych parametrów jest kluczowa dla ciągłości i efektywności zasilania procesów technologicznych w przemyśle rolno-spożywczym. Uzyskane wyniki potwierdzają, że optymalizacja składu mieszaniny biomasy energetycznej stanowi efektywne narzędzie do stabilizacji parametrów termodynamicznych pary wodnej, zapewniając jednocześnie niezawodność i efektywność energetyczną procesu.

Przeprowadzone doświadczenia potwierdzają, że wykorzystanie produktów ubocznych oraz odpadów organicznych jako surowców energetycznych przyczynia się do efektywnej produkcji taniej energii. Analizy techniczne wykazały, że systemy oparte na spalaniu biomasy odpadowej pochodzenia roślinnego pozwalają znacząco obniżyć koszty zakupu paliw kopalnych oraz koszty utylizacji odpadów. Ponadto, integracja tych procesów z instalacjami produkcyjnymi umożliwia bezpośrednie wykorzystanie wytworzonej energii

cieplnej i elektrycznej do zasilania technologii produkcyjnych, co zwiększa efektywność energetyczną zakładów. Empiryczne dane z funkcjonujących instalacji wskazują na realne oszczędności ekonomiczne i ekologiczne, potwierdzając tym samym hipotezę, że zagospodarowanie odpadów rolno-spożywczych na cele energetyczne umożliwia produkcję taniej i odnawialnej energii do produkcji żywności.

Badania prowadzone w zakresie zagospodarowania produktów spalania biomasy energetycznej, w szczególności popiołów paleniskowych i lotnych, potwierdzają ich pozytywny wpływ na zmniejszenie negatywnych oddziaływań przemysłu rolno-spożywczego na środowisko naturalne. Analizy chemiczne wykazały, że produkty te zawierają wartościowe składniki mineralne, takie jak wapń, potas, magnez i fosfor, które mogą być efektywnie wykorzystywane w rolnictwie jako nawozy lub środki poprawiające właściwości gleby. Zastosowanie produktów spalania biomasy w agrotechnice wpisuje się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym, co sprzyja redukcji emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń środowiska. Uzyskane dane oraz studia przypadków jednoznacznie potwierdzają, że skuteczne zagospodarowanie produktów spalania biomasy energetycznej zmniejsza środowiskowy ślad przemysłu rolno-spożywczego.

## 10. SPIS LITERATURY

1. Arshad, M.A., Soon, Y.K., Azooz, R.H., Lupwayi, N.Z., Chang, S.X. Soil and crop response to wood ash and lime application in acidic soils. *Agron. J.* (2012) 104, 715–721.
2. Balat, M., Balat, H. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied Energy*, (2009) 86 (11), 2273-2282.
3. Balcerek, M., Pielech-Przybylska, K., Dziekońska-Kubczak, U., Patelski, P., Strąk, E. Fermentation Results and Chemical Composition of Agricultural Distillates Obtained from Rye and Barley Grains and the Corresponding Malts as a Source of Amylolytic Enzymes and Starch. *Molecules* (2016): 21, 1320.
4. Bang-Andreasen, T., Anwar, M.Z., Lanzén, A., Kjøller, R., Rønn, R., Ekelund, F., Jacobsen, C.S. Total RNA sequencing reveals multilevel microbial community changes and functional responses to wood ash application in agricultural and forest soil. *FEMS Microbiol. Ecol.* (2020) 96: 3.
5. Bang-Andreasen, T., Peltre, M., Ellegaard-Jensen, L., Hansen, L. H., Ingerslev, M., Rønn, R., Kjøller, R. Application of wood ash leads to strong vertical gradients in soil pH changing prokaryotic community structure in forest top soil. *Scientific Reports*, (2021) 11(1): 742.
6. Basu, P. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory.* Academic Press, (2010).
7. Baxter, L.L. Biomass-coal co-combustion: Opportunity for affordable renewable energy. *Fuel*, (2011) 90(11): 2486–2489.
8. Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., Kiel, J.H.A., Verkooijen, A.H.M. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations, effects of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of biomass. Energy Research Centre of the Netherlands, (2005). <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20670903>.
9. Berndes, G., Hoogwijk, M., van den Broek, R. The contribution of biomass in the future global energy supply: A review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy*, (2003) 25(1): 1–28.
10. Boström, D., Skoglund, N., Grimm, A., Boman, C., Öhman, M., Broström, M., Backman, R. Ash Transformation Chemistry during Combustion of Biomass. *Energy Fuels* (2012) 26: 85–93.

11. Bradna, J., Malat'ák, J., Hájek, D. The properties of wheat straw combustion and use of fly ash as a soil amendment. *Agronomy Research* (2016) 14(4): 1257–1265.
12. Brassard, P, Godbout, S, Raghavan, V. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: key parameters and mechanisms involved. *J. Environ. Manag.* (2016) 181: 484–497.
13. Bridgwater, A.V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, (2012) 38: 68-94.
14. Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T. Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: a review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2012) 16(3): 1462-1476.
15. Cherubini, F. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, (2010) 51(7): 1412-1421.
16. Cherubini, F., Strømman, A. H. Life cycle environmental impacts of biomass combustion for energy purposes. *Energy Conversion and Management*, (2011) 52(1): 227-237.
17. Chmielniak, T., *Technologie energetyczne*. WNT, Warszawa (2013).
18. Chmielowiec, M. Biomasa jako źródło energii odnawialne w Unii Europejskiej i w Polsce – zagadnienia ekonomiczno-prawne. *Energia Gigawat* (2020). 3-4: 24– 32.
19. Chudy, R., Szulecki, K., Siry, J., Grala, R. Biomasa drzewna jako surowiec dla energetyki. *ACADEMIA. Magazyn Polskiej Akademii Nauk* (2021) 1 (65): 62-65.
20. Ciesielczuk, T., Kusza, G. Nemś, A. Nawożenie popiołami z termicznego przekształcania biomasy źródłem pierwiastków śladowych dla gleb. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* (2011) 49: 219–227.
21. Cruz, N. C., Rodrigues, M.S., Carvalho, L., Duarte, A.C., Pereir E., Römken, P.F.A.M. Tarelho, L.A.C., Ashes from fluidized bed combustion of residual forest biomass: recycling to soil as a viable management option. *Environmental Science and Pollution Research* (2017) 24: 14770–14781.
22. da Costa, T.P., Quinteiro, P., Tarelho L.A.C, Arroja, L., Dias, A.C. Life cycle assessment of woody biomass ash for soil amelioration. *Waste Management* (2020) 101: 126–140.
23. Demeyer, A., Voundi Nkana, J., Verloo, M. Characteristics of wood ash influence on soil properties and nutrient uptake: An overview. *Bioresour. Technol.* (2001) 77: 287295.

24. Demirbas, A. Biofuels securing the planet's future energy needs. *Energy Conversion and Management*, (2009) 50(9): 2239-2249.
25. Demirbas, A. Importance of biomass energy sources for Turkey. *Energy Policy*, (2007) 35(8): 4242-4250.
26. Di Blasi, C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, (2008) 34(1): 47-90.
27. Diatta, J., Kowalski, M. Popioły ze spalania biomasy roślinnej (fitopopioły) – recykling i agrochemiczny potencjał. Referaty XXIV Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki. Sopot (2017) 1 – 15.
28. Díaz-Ramírez, M., Frandsen, F.J., Glarborg, P., Sebastián, F., Royo, J. Partitioning of K, Cl, S and P during combustion of poplar and brassica energy crops. *Fuel* (2014) 134: 209–219.
29. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 z 11.12.2018 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych (wersja przekształcona) (Dz.Urz. UE L 328/82).
30. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych.
31. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (Dz.U. L 334 z 17.12.2010, pp. 17–119)
32. Emilsson, S. *International Handbook: From Extraction of Forest Fuels to Ash Recycling*. Skogsstyrelsen, Swedish Forest Agency. (2006) ISBN 91-9755555-1-7. 42.
33. European Commission. *EU Bioenergy Outlook*. Joint Research Centre, (2021).
34. Faaij, A. Bio-energy in Europe: driving forces and its future role. *Energy Policy*, (2006a) 34(11), 3220-3245.
35. Faaij, A. Modern biomass conversion technologies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, (2006b) 11(2): 343–375.
36. Ferens W. Kaloryczność paliw stałych, *Zeszyty Energetyczne*. T. 1, Problemy współczesnej energetyki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej (2014), s. 149–158.
37. Freire, M., Lopes, H., Tarelho, L.A.C. Critical aspects of biomass ashes in soils: composition, leachability, PAH and PCDD/F. *Waste Manag*, (2015) 46: 304–315.

38. Füzesi, I., Heil, B., Kovács, G. Effects of wood ash on the chemical properties of soil and crop vitality in small plot experiments. *Acta Silv. Lign. Hung.* (2015) 11(1): 55-64.
39. Gebele, Ch. Warunki energetycznego wykorzystania biomasy stałej. *Czysta Energia*, (2004) 5: 24–25.
40. Gibczyńska, M., Stankowski, S., Hury, G., Kuglarz, K. Effects of limestone, ash from biomass and compost use on chemical properties of soil. *Soil Sc. Annual* (2014) 65, 2: 59-64.
41. Głodek E. Spalanie i współspalanie biomasy. Przewodnik, Wyd. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Opole (2010).
42. Grabowski M., Optymalizacja procesów spalania w systemach multipaliwowych na przykładzie przemysłu rolno-spożywczego, Politechnika Warszawska, 2021.
43. Gradowski T., Thomas S.C. Phosphorus limitation of sugar maple growth in central Ontario. *Forest Ecology and Management*, (2006) 226, 1-3: 104 – 109.
44. Gradziuk P. Biopaliwa. Wyd. Wieś Jutra, Warszawa (2002).
45. Hardy, T., Kordylewski, W., Mościcki, K. Zagrożenie korozją chlorkową w wyniku spalania i współspalania biomasy w kotłach. *Archiwum Spalania* (2009) 9, 3-4: 181-195.
46. Hedayati, A, Lindgren, R., Skoglund, N., Boman, C., Kienzl N., Öhman, M. Ash Transformation during Single-Pellet Combustion of Agricultural Biomass with a Focus on Potassium and Phosphorus. *Energy Fuels* (2021) 35: 1449–1464.
47. Huang, X., Pan, G., Li L., Zhang, X., Wang, H., Bolan, N., Pal Singh, B., Ma, C., Liang, F., Chen, Y., Li, H. Combined resource utilization of ash from biomass power generation and wheat straw biochar for soil remediation. *Applied Soil Ecology*, (2024) 105150.
48. Huber, G. W., Iborra, S., Corma, A. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering. *Chemical Reviews*, (2006) 106(9): 4044–4098.
49. IPCC. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, (2014).
50. IPCC. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, (2022).

51. Jagustyn, B., Bątopek-Giesa, N., Wilk, B. Ocena właściwości biomasy wykorzystywanej do celów energetycznych. *Chemik* (2011) 65, 6: 557–563
52. Jagustyn, B., Patyna, I., Skawińska, A.; Ocena właściwości fizykochemicznych Palm Kernel Shell jako biomasy agro stosowanej w energetyce. *Chemik* (2013), 67 (6), s. 553.
53. Jarosz-Krzemińska, E., Poluszyńska, J. Repurposing Fly Ash Derived from Biomass Combustion in Fluidized Bed Boilers in Large Energy Power Plants as a Mineral Soil Amendment. *Energies* (2020) 13: 4805.
54. Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (Eds.). *Energy from Biomass: Fundamentals, Techniques and Technologies* (2nd ed.). Springer, (2016).
55. Kamiński, T. Wykorzystanie biogazu i biopaliw w zakładach przetwórstwa spożywczego. *Przegląd Energetyczny* (2019) 4: 32–40.
56. Knothe, G. Biodiesel and renewable diesel: A comparison. *Progress in Energy and Combustion Science*, (2010) 36(3): 364-373.
57. Kowalkowski, A., Olejarski, J. Możliwości wykorzystania popiołów z biomasy leśnej jako źródła elementów odżywczych. wyd. *Biomasa leśna na cele energetyczne. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, Sękocin Stary* (2013).
58. Kowalski J., *Biopaliwa i bioprodukty w systemach energetycznych*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2019.
59. Kowalski J., Nowak P., *Zastosowanie systemów multipaliwowych w przemyśle rolno-spożywczym*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2022.
60. Koziół, M. Effect of air distribution and process duration on the emissions during combustion of alternative fuel. *Proceedings of ECOpole*, (2020)14(1): 11–17.
61. Krzyżaniak, A., Sławiński, M. *Technologie multipaliwowe w energetyce odnawialnej*, Wydawnictwo Naukowe PWN (2021).
62. Kurzemann, F.R., Juárez, M.F.-D., Probst, M., Gómez-Brandón, M., Spiegel, H., Resch, R., Insam, H., Pötsch, E.M. Biomass Ash as a Substitute for Lime and Its Impact on Grassland Soil, Forage, and Soil Microbiota. *Agronomy* (2024) 14 (7): 1568.
63. Lech-Brzyk, K. Emisja wybranych zanieczyszczeń podczas spalania biomasy w kotłach o mocy 2–4 MW. *Ochrona Środowiska* (2014): 36(2).
64. Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge (2015).

65. Lewandowski, W.M., Aranowski, R. *Technologie ochrony środowiska w przemyśle i energetyce*, PWN Warszawa (2016).
66. Majoch, A., Jabłońska, M. Bioodpady jako nowe źródło energii odnawialnej. *Nafta-Gaz*, (2013) LXIX, 9: 673–682.
67. Malińska, K. Biowęgiel odpowiedzią na aktualne problemy ochrony środowiska. *Inżyn. i Ochr. Środow.* (2012) 15, 4: 387-403.
68. Mani, S., Sokhansanj, S., Bi, X.T. Economics of producing fuel pellets from biomass. *Applied Engineering in Agriculture*, (2006) 22(3): 421-426.
69. Maresca, A., Hyks, J., Astrup, T.F. Recirculation of biomass ashes onto forest soils: ash composition, mineralogy and leaching properties. *Waste Management* (2017) 70: 127-138.
70. McKendry, P. Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, (2002a) 83(1), 37–46.
71. McKendry, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, (2002b) 83(1): 47-54.
72. Meller E., Bilenda E. Wpływ nawożenia popiołami z biomasy na plon i pobranie składników przez kukurydzę zwyczajną. *Polityka Energetyczna* (2013) 16 (3): 339–345.
73. Meller, E.; Bilenda, E. Wpływ popiołów ze spalania biomasy na właściwości fizykochemiczne gleb lekkich. *Polityka Energetyczna* (2012) 15, (6): 287–292.
74. Mercl, F., Tejnecký, V., Száková, J., Tlustoš, P. Nutrient Dynamics in Soil Solution and Wheat Response after Biomass Ash Amendments *Agron. J.* (2016) 108: 2222–2234.
75. Mohan, D., Pittman Jr, C.U., Steele, P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & Fuels*, (2006) 20(3): 848-889.
76. Munawar, M.A., Khoja, A.H., Naqvi, S.R., Mehran, M.T., Liaquat, R., Dawood, U.F. Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2021) 150: 111451.
77. Murphy, J. D., McCarthy, K., McDonnell, K., Kiely, G. Life cycle assessment of biomethane from grass silage via anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, (2011) 102(2): 828-836.
78. Norma PN-EN 13342:2002 Oznaczenie zawartości azotu.
79. Norma PN-EN ISO 16948:2015-07 Oznaczenie zawartości węgla.

80. Norma PN-EN ISO 16994:2016-10 Oznaczenie zawartości siarki.
81. Norma PN-EN ISO 18122:2016-01 Oznaczenie zawartości popiołu.
82. Norma PN-EN ISO 18125:2017-07 Oznaczanie wartości opałowej.
83. Norma PN-EN ISO 18134-1:2015-11 Oznaczanie zawartości wilgoci.
84. Nowak, P., Zastosowanie wywaru pogorzelnianego w energetyce biomasowej. *Przegląd Energetyczny* (2020) 3: 45–52.
85. Nussbaumer, T. Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. *Energy & Fuels*, (2003) 17(6): 1510–1521.
86. Obwieszczenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 21 grudnia 2015 r (Dz.U. 2016 poz. 71)
87. Ochecova, P., Tlustos, P., Szakova, J. Wheat and soil response to wood fly ash application in contaminated soils. *Agron. J.* (2014) 106: 995–1002.
88. Odziejewicz, J.I., Wołejko, E., Wydro, U., Wasil, M., Jabłońska-Trypuć, A. Utilization of Ashes from Biomass Combustion. *Energies* (2023) 15: 9653.
89. Olatoyan, O., Kareem, M., Adebajo, A., Olawale, S., Alao, K. Potential use of biomass ash as a sustainable alternative for fly ash in concrete production. (2023), 4: 10076.
90. Ondrasek, G., Zovko, M., Kranjčec, F., Savić, R., Romić, D., Rengel, Z. Wood biomass fly ash ameliorates acidic, low-nutrient hydromorphic soil & reduces metal accumulation in maize. *Journal of Cleaner Production*. (2021) 283: 124650.
91. Pająk, T. Biomasa jako odnawialne źródło energii – szanse i zagrożenia dla zrównoważonego rozwoju. *Przegląd Elektrotechniczny* (2015) 91(6): 69–72.
92. Patterson, S.J, Acharya, S.N, Thomas, J.E, Bertschi, A.B, Rothwell, R.L. Integrated soil and crop management: Barley biomass and grain yield and canola seed yield response to land application of wood ash. *Agron. J.* (2004) 96(4): 971–977.
93. Pels, J. Sarabèr, A. Utilization of Biomass Ashes. [In:] Grammelis P. (red.) *Solid Biofuels for Energy. Green Energy and Technology* (2011). Springer, London.
94. Perucci, P., Monaci, E., Onofri, A., Vischetti, C., Casucci, C. Changes in physico-chemical and biochemical parameters of soil following addition of wood ash: A field experiment. *Eur. J. Agron.* (2008) 28: 155–161.

95. Pielech-Przybylska, K., Balcerek, M., Klebeko, M., Dziekońska-Kubczak, U., Hebdzyński, M. Ethanol fermentation of rye mashes: Factors influencing the formation of aldehydes and process efficiency. *Biomolecules* (2022): 12, 1085.
96. Pietruszka, M., Szopa, J.S. Agricultural distillates from Polish varieties of rye. *Czech J. Food Sci.* (2014): 32(4):406-411.
97. Płóciennik, M., Skrzyniarz, M., Wróblewski, K. Analiza emisji zanieczyszczeń podczas współspalania biomasy o różnym pochodzeniu. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture* (2018) 65(4): 297–308.
98. Połec, B., Baryga, A., Szymański, T. Fermentacja metanowa organicznych odpadów cukrowniczych jako źródło energii odnawialnej i bionawozu. Wydawnictwo SGGW, Warszawa (2019).
99. Polska Norma PN-EN ISO 17225-1 (2014). Biopaliwa stałe. Specyfikacje paliw i klasy. Część 1: Wymagania ogólne.
100. Poluszyńska, J. Możliwości zastosowania popiołów ze spalania biomasy w gospodarowaniu osadami ściekowymi, *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*, (2013) 6 (13): 49-59.
101. Popławski, T. Uwarunkowania i zasady funkcjonowania obszarów samowystarczalnych energetycznie – wybrane aspekty, „Nowa Energia”, (2019) 3 (68): 6 – 11.
102. Pöykiö, R., Mäkelä, M., Nurmesniemi, H., Dahl, O., Oguchi, M. Application of the BRC Sequential Extraction Scheme for Assessing the Leaching of Elements in Wood-Based Ash 658 Fractions from a Large- Sized (115 MW) Industrial Power Plant of a Pulp and Board Mill. *Waste and Biomass Valorization* (2012) 4: 821–830.
103. Procedura badawcza nr PB/FCH/89/A:27.02.2014 Oznaczenie zawartości chloru.
104. Pugliese, S., Jones T., Preston, M.D., Hazlett, P., Tran H., Basiliko, N. Wood ash as a forest soil amendment: The role of boiler and soil type on soil property response. *Can. J. Soil Sci.* (2014) 94: 621-634.
105. Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12.07.2019 r. (Dz.U. 2019 r., poz. 1311).
106. Rozporządzenie Ministra Klimatu z 02.01.2020 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. z 2020 r. poz. 10).
107. Rozporządzenie Ministra Klimatu z 11.09.2020 r. w sprawie szczegółowych wymagań dla magazynowania odpadów (Dz.U. z 2020 r. poz. 1742).

108. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1.03.2018 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów (Dz. U. z 2018 r. poz. 680)
109. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20.01.2015 r. w sprawie procesu odzysku R10 (Dz. U. 2015 r., poz. 132).
110. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 05.04.2011 r. w sprawie procesu odzysku R10 (Dz.U. 2011 nr 86 poz. 476).
111. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 09.09.2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi. (Dz.U. 2002 nr 165 poz. 1359)
112. Rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. Nr 119, poz. 765),
113. Russell, I. Understanding yeast fundamentals. In *The Alcohol Textbook*, 4th ed.; Jacques, K.A., Lyons, T.P., Kelsall, D.R., (Eds.); Alltech Inc.: Nicholasville, KY, USA, (2003).
114. Rybak, W. Spalanie i współspalanie biopaliw stałych. Wyd. Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (2006).
115. Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., Mekhilef, S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2011) 15(5): 2262-2289.
116. Sánchez, Ó.J. Bioethanol production: Advances and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2009) 13(1): 14-29.
117. Santás-Miguel, V., Fernández-Sanjurjo, M.J., Núñez-Delgado, A., Álvarez-Rodríguez, E., Díaz-Ravina, M., Arias-Estévez, M., Fernández-Calviño, D. Use of biomass ash to reduce toxicity affecting soil bacterial community growth due to tetracycline antibiotics. *Journal of Environmental Management* (2020) 269: 110838.
118. Schiemenz, K., Eichler-Löbermann B. Biomass ashes and their phosphorus fertilizing effect on different crops. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, (2010) 87: 471–482.
119. Ściążko, M., Zieliński H., *Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy*. Wyd. Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla, Kraków–Zabrze (2003).
120. Ściążko, M., Zuwała, J., Pronobis, M., *Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w energetyce*. Wyd. IChPW, Politechnika Śląska, Zabrze (2007).

121. Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Yu, T.H. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science* (2008), 319(5867): 1238–1240.
122. Silva, F., Cruz, N.C, Tarelho, L.A.C., Sónia, M. Rodrigues, S.M. Use of biomass ash-based materials as soil fertilisers: Critical review of the existing regulatory framework. *J. Cleaner Prod.*, (2019) 214: 112-124.
123. Slade, R., Bauen, A., Gross, R. Global bioenergy resources. *Nature Climate Change*, (2014) 4(2): 99–105.
124. Stankowski, S., Chajduk, E., Osińska, B., Gibczyńska, M. Biomass ash as potential raw material for the production of mineral fertilizers. *Agron. Res.* (2021) 19: 1999 – 2012.
125. Szostek, M.; Szpunar-Krok, E.; Ilek, A. Chemical Speciation of Trace Elements in Soil Fertilized with Biomass Combustion Ash and Their Accumulation in Winter Oilseed Rape Plants. *Agronomy* (2023) 13: 942.
126. Thunman, H., Leckner, B. Ignition and propagation of a reaction front in cross-current bed combustion of wet biofuels. *Fuel*, (2001) 80(4): 473–481.
127. Torp, M., Rasi, S., Rintala, J., Lähde, K. Torrefaction of biomass to improve fuel properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2019) 101: 331–340.
128. Tosti, L., van Zomeren A., Pels J., Damgaard A., Comans R. Life cycle assessment of the reuse of fly ash from biomass combustion as secondary cementitious material in cement products. (2020) 245: 118937.
129. Tosti, L., van Zomeren, A., Pels, J.R., Joris, J. Dijkstra, J.J., Comans, R.N.J. Assessment of biomass ash applications in soil and cement mortars. *Chemosphere* (2019) 223: 425-437.
130. Uliasz-Bocheńczyk, A., Mazurkiewicz, M., Mokrzycki, E. Popioły z energetyki – odpad, produkt uboczny, surowiec. (2015a) 31 (4): 139-150.
131. Uliasz-Bocheńczyk, A., Mokrzycki, E.; Biomasa jako paliwo w energetyce. *Rocznik Ochrona Środowiska* (2015b), 17(2): 900 – 913.
132. Uliasz-Bocheńczyk, A., Pawluk, A., Sierka, J. Wymywalność zanieczyszczeń z popiołów lotnych ze spalania biomasy. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* (2015c) 31, 3: 145–156.
133. Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz. U. z 2021 r. poz. 76 z 2022 poz. 1370 ze zm.).

134. Ustawa z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie (Dz.U. 2020, poz. 2187).
135. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. O odpadach (Dz. U. 2022 r., poz. 699).
136. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2021 r., poz. 1973 ze zm.) – tekst ujednolicony.
137. van Dam, J., Junginger, M., Faaij, A., Jürgens, I., Best, G., Fritsche, U. Overview of recent developments in sustainable biomass certification. *Biomass and Bioenergy*, (2008) 32(8): 749–780.
138. Vassilev, S., Baxter, D., Andersen I., Vassileva, C.G. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, (2010) 89 (5):, 913–933.
139. Vassilev, S., Baxter, D., Andersen, L., Vassileva, C.G. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilization, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel* (2013b) 105: 19–39.
140. Vassilev, S.V., Baxter, D, Andersen, L.K., Vassileva, C.G. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Fuel, Phase–mineral and chemical composition and classification. *Fuel* (2013a) 105: 40–76.
141. Vassilev, S.V., Vassileva, C.G., Baxter, D. Trace element concentrations and associations in some biomass ashes. *Fuel* (2014) 129: 292–313.
142. Voshell, S., Mäkelä, M., Olli, D. A review of biomass ash properties towards treatment and recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2018) 96: 479–486.
143. Waławowicz, R. Wpływ popiołów pochodzących ze spalania biomasy na porażenie pszenicy jarej przez *Gaeumannomyces graminis*. *Progress in Plant Protection /Postępy w Ochronie Roślin*. (2022) 52, 2: 397-400.
144. Wandrasz, J., Wandrasz, A. Paliwa formowane biopaliwa i paliwa z odpadów w procesach termicznych. Wyd. "Seidel-Przywecki" Sp. z o.o., Warszawa, (2006).
145. Wang, R, ZongGuo, H., Hu, R., Wu , J., Xu, Y., Yu, Z., Yang, L., Yan, G., Liu, J., Zhang, Y. Biomass ash as soil fertilizers: Supercharging biomass accumulation by shifting auxin distribution. *Chemosphere*, (2024) 357: 141910.
146. Wasilewski, J., Zając, A. Współspalanie biomasy rolniczej z biomasą leśną - analiza właściwości mieszanek paliwowych. *Journal of Power and Energy Engineering* (2015) 3(02): 1-10.
147. Waste Framework Directive (2008/98/EC) of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives.

148. Weiland, P. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, (2010) 85(4): 849-860.
149. Werle, S., Wilk, J. B. A review of methods for the thermal utilization of biomass and sewage sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2010) 14(9): 2863–2871.
150. Wilczyńska-Michalik, W., Gasek, R., Michalik, M., Dańko, J. Mineralogy, chemical composition and leachability of ash from biomass combustion and biomass coal co-combustion. *Mineralogia* (2018) 1-4: 67-97.
151. Wilk B. Określenie zależności wartości opałowej od wybranych właściwości fizykochemicznych biomasy. *Mat. Seminar. „Techniki analityczne i procedury badawcze w zastosowaniu do nowych uwarunkowań prawnych w energetyce”*. IChPW, Zabrze (2006).
152. Wójcik M., Stachowicz F., Masłoń A. The Use of Wood Biomass Ash in Sewage Sludge Treatment in Terms of Its Agricultural Utilization. (2020): 11(2): 753 – 768.
153. Wolański B., Świechowski K., Kierzek K., Opaliński S. Warunki pirolizy a właściwości fizyczno-chemiczne biowęgla pochodzenia roślinnego. *Przem. Chem.* (2024) 103/4: 541-544.
154. Yalcin SK., Yesim O.Z. Effects of pH and temperature on growth and glycerol production kinetics of two indigenous wine strains of *Saccharomyces cerevisiae* from Turkey. *Brazilian Journal of Microbiology*, (2008) 39(2): 325-332.
155. Zarębska J. Gospodarka o obiegu zamkniętym drogą do zrównoważonego rozwoju. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji* (2017) 6 (7): 286-295.
156. Zarębski P. Analiza efektów zewnętrznych transportu biomasy (2012) 4, 1406-1413.
157. Zhai J., Burke I.T., Stewart, D.I. Beneficial management of biomass combustion ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2021) 151: 11155.
158. Zhang, J., Li, S., Xiao, G., Zhang, L., Jiang, D. Biomass gasification for syngas production: current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2014) 37, 427-438.
159. Zieliński M., *Optymalizacja procesów spalania biomasy i biopaliw ciekłych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, (2018).

## SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 1. Obieg dwutlenku węgla w przyrodzie (Źródło: Opracowanie własne). .....	11
Rysunek 2. Przykładowe rodzaje biomasy energetycznej (Źródło: Opracowanie własne). .....	12
Rysunek 3. Donice z przygotowanym podłożem (Źródło: Fot. własna). .....	85
Rysunek 4. Odczyn gleby (pH w 1 M KCl) po zastosowaniu różnych rodzajów popiołów w zróżnicowanych dawkach (Źródło: Badania własne). .....	86
Rysunek 5. Zawartość azotu w glebie (Źródło: Badania własne). .....	87
Rysunek 6. Zawartość fosforu w glebie (Źródło: Badania własne). .....	88
Rysunek 7. Zawartość potasu w glebie (Źródło: Badania własne). .....	89
Rysunek 8. Zawartość magnezu w glebie (Źródło: Badania własne). .....	90
Rysunek 9. Zawartość wapnia w glebie (Źródło: Badania własne). .....	91
Rysunek 10. Stan doświadczenia w marcu i kwietniu 2024 r. (Źródło: Fot. własna). ...	92
Rysunek 11. Stan doświadczenia w maju i lipcu 2024 r. (Źródło: Fot. własne). .....	93

## SPIS TABEL

Tabela 1. Standardy emisyjne dla jednostek biomasowych. ....	28
Tabela 2. Maksymalny ładunek zanieczyszczeń z kotłowni biomasowej. ....	29
Tabela 3. Typowe odpady i produkty uboczne z różnych gałęzi przemysłu. ....	52
Tabela 4. Klasyfikacja biomasy. ....	53
Tabela 5. Rodzaje biomasy odpadowej. ....	55
Tabela 6. Biomasa możliwa do wykorzystania w technologii Polmos Żyrardów Sp. z o.o. .....	57
Tabela 7. Biomasa odpadowa z województwa łódzkiego i mazowieckiego. ....	58
Tabela 8. Współczynniki do przeliczania wartości parametrów paliw stałych. ....	64
Tabela 9. Porównanie zawartości metali ciężkich w badanych popiołach ze spalania różnych rodzajów biomasy w kotłowni z najwyższymi stężeniami dopuszczalnymi przy rolniczym wykorzystaniu. ....	72
Tabela 10. Porównanie wartości wybranych parametrów jakości badanych popiołów ze spalania różnych rodzajów biomasy w kotłowni. ....	74

Tabela 11. Stopień wymywania metali ciężkich z popiołów powstałych w procesie spalania różnego rodzaju biomasy.....	76
Tabela 12. Porównanie stężeń metali ciężkich w wyciągu wodnego z badanych popiołów ze spalania biomasy z najwyższymi stężeniami dopuszczalnymi przy wprowadzaniu do wód lub ziemi.....	78
Tabela 13. Zawartość makroskładników w glebie pobranej po zbiorze żyta.....	91
Tabela 14. Plon i cechy biometryczne żyta w doświadczeniu wazonowym.....	96
Tabela 15. Zawartość makroelementów w organach nadziemnych żyta w doświadczeniu wazonowym. ....	98
Tabela 16. Skład chemiczny ziarna żyta.....	102
Tabela 17. Skład zacierów słodkich.....	104
Tabela 18. Ekstrakt i pH zacierów odfermentowanych. ....	106
Tabela 19. Skład zacierów odfermentowanych. ....	108
Tabela 20. Lotne związki w zacierach odfermentowanych – część 1.....	110
Tabela 21. Lotne związki w zacierach odfermentowanych – część 2.....	111
Tabela 22. Lotne związki w zacierach odfermentowanych – część 3.....	112