

INSTYTUT TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY
- PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY
W FALENTACH

MGR INŻ. MAGDALENA TYMIŃSKA

WPŁYW JAKOŚCI I STRUKTURY SUBSTRATU
POFERMENTACYJNEGO Z ROLNICZYCH
INSTALACJI BIOGAZOWYCH NA EFEKTY
PRODUKCJI ROLNICZEJ

IMPACT OF THE DIGESTATE FROM AGRICULTURAL BIOGAS
FACILITIES ON THE EFFICIENCY OF AGRICULTURAL PRODUCTION

ROZPRAWA DOKTORSKA

Praca wykonana pod kierunkiem:

dr. hab. inż. Andrzeja Borusiewicza, prof. MANS

w Łomży

oraz promotora pomocniczego:

dr. hab. inż. Zbigniewa Skibko, PB w Białymstoku

Falenty – Warszawa 2024

Spis treści

1. Analiza zagadnienia	3
1.1. Wstęp	3
1.2. Substraty wykorzystywane w biogazowniach rolniczych	11
1.3. Wykorzystanie pofermentu jako nawozu naturalnego.....	13
1.4. Zdefiniowanie problemu	19
1.5. Cel i zakres pracy.....	20
2. Metodyka badań	22
2.1. Opis technologii biogazowni rolniczej	23
2.2. Opis pola badawczego	27
3. Wyniki badań pofermentu i ich omówienie	30
4. Wyniki badań terenowych i ich omówienie	50
4.1. Warunki pogodowe	50
4.2. Wyniki badań i ich analiza.....	51
5. Podsumowanie pracy.....	74
6. Wnioski końcowe	76
Literatura.....	78

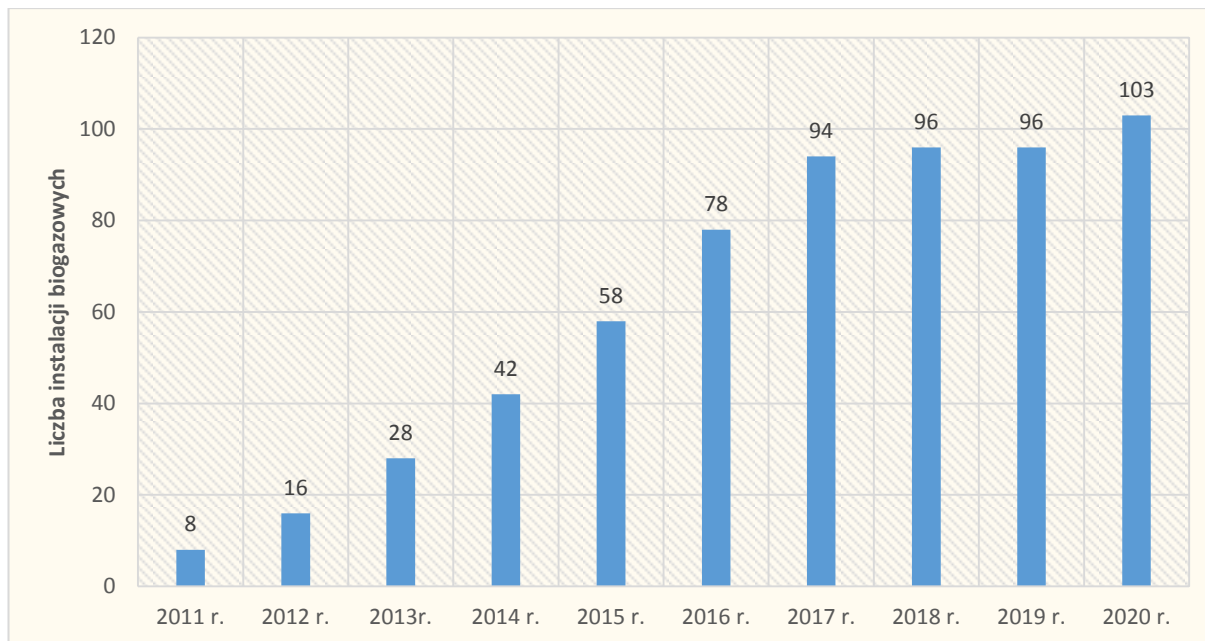
1. Analiza zagadnienia

1.1. Wstęp

Poferment jest produktem ubocznym w procesie wytwarzania biogazu w biogazowniach rolniczych [Maczyszyn 2010]. Głównym produktem powstającym w biogazowniach jest biogaz, który zgodnie z definicją podaną w ustawie o odnawialnych źródłach energii [Ustawa 2015] jest gazem otrzymywanym „w procesie fermentacji metanowej surowców rolniczych, produktów ubocznych rolnictwa, płynnych lub stałych nawozów naturalnych, produktów ubocznych, odpadów lub pozostałości z przetwórstwa produktów pochodzenia rolniczego, biomasy leśnej lub biomasy roślinnej zebranej z terenów innych niż zaewidencjonowane jako rolne lub leśne, z wyłączeniem biogazu pozyskanego z surowców pochodzących ze składowisk odpadów, a także oczyszczalni ścieków, w tym zakładowych oczyszczalni ścieków z przetwórstwa rolno-spożywczego, w których nie jest prowadzony rozdział ścieków przemysłowych od pozostałych rodzajów osadów i ścieków”.

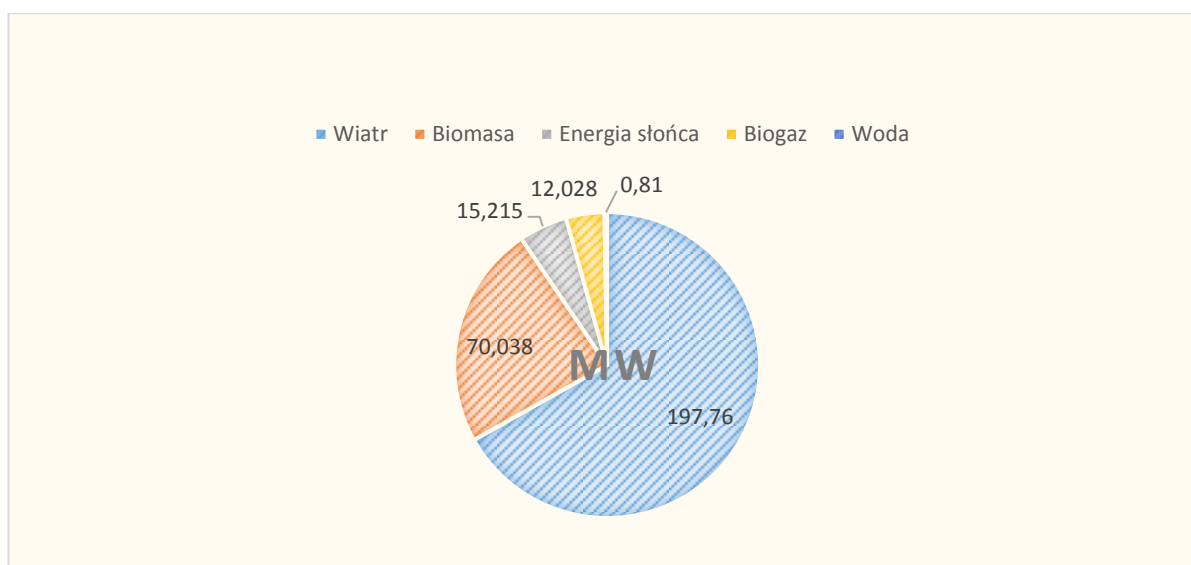
Biogazownie rolnicze należą do grupy odnawialnych źródeł energii (OZE), przez co w ostatnich latach wzrasta nimi zainteresowanie. Rozwój źródeł niekonwencjonalnych wynika również z realizacji przez Polskę zobowiązań pakietu klimatycznego 3x20 [Wardal 2014]. Zakłada się, iż do końca 2030 roku w Polsce z odnawialnych źródeł energii będzie pochodzić 20% energii wytwarzanej ogółem w kraju [Wałowski 2019]. Aktualnie zakłada się, że Polska w przeciągu najbliższego roku zwiększy dwukrotnie ilość energii produkowanej w biogazowniach [Klimczak 2020].

Na świecie w 2014 roku pracowało 17 240 instalacji biogazowych [EBA 2020]. W Polsce rozwój biogazowni rolniczych do roku 2017 był bardzo dynamiczny, jednakże w ostatnich latach liczba nowobudowanych instalacji biogazowych wyraźnie się zmniejszyła – rysunek 1.1.

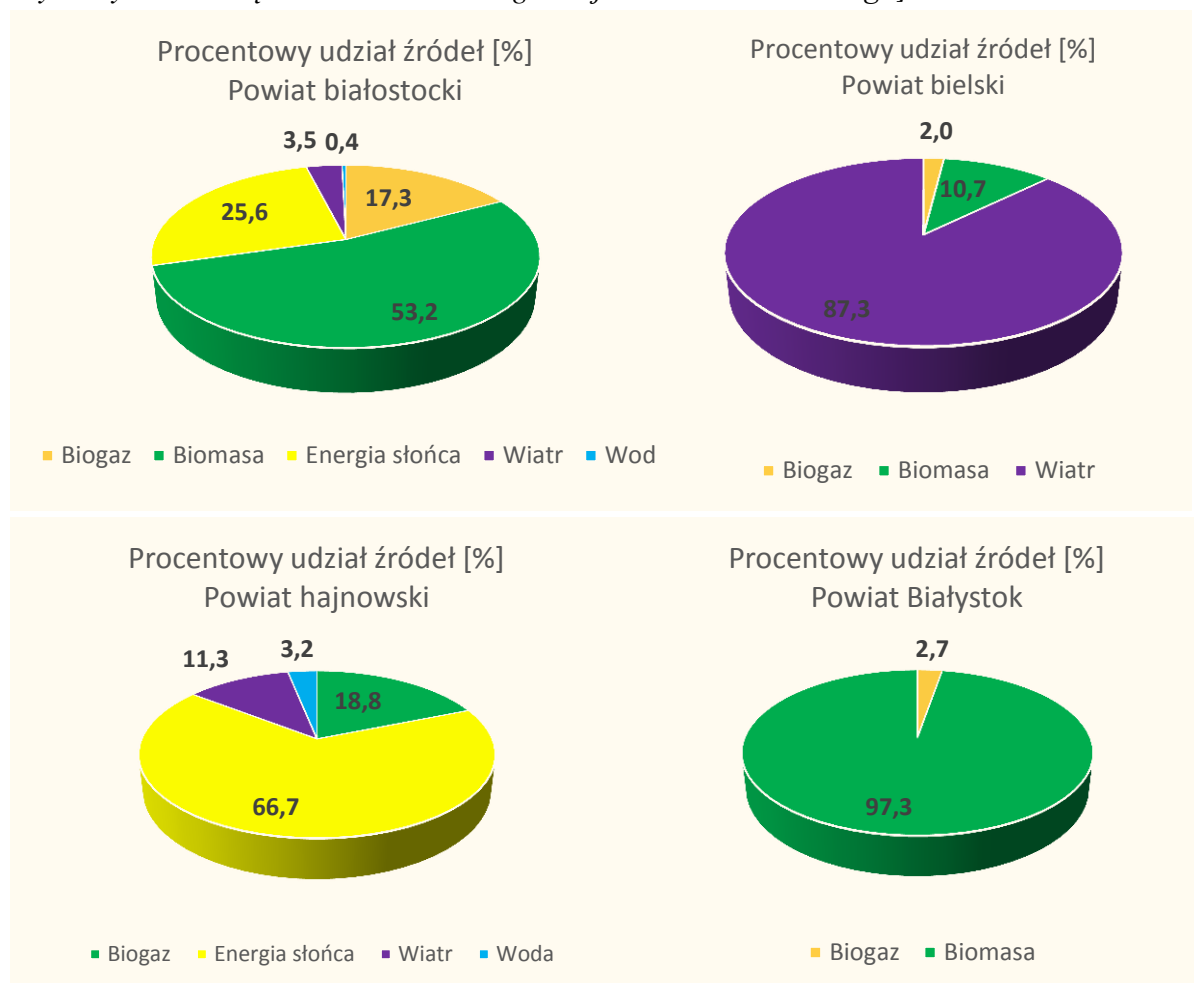


Rys. 1.1. Liczba instalacji biogazowych wpisanych 1 stycznia danego roku do rejestru wytwórców biogazu [KOWR 2020]

Województwo podlaskie charakteryzuje się znacznym udziałem biogazowni rolniczych w ogólnym bilansie źródeł energii, co jest wynikiem przede wszystkim szeroko rozwiniętego chowu zwierząt [Gołasa 2014]. Jednakże w 2019 roku moc w elektrowniach biogazowych stanowiła jedynie około 4 % energii odnawialnej ogółem zainstalowanej w województwie (rysunek 1.2.). Produkcja ta skupiła się głównie w powiatach: Białystok, Suwałki, białostockim, bielskim, hajnowskim, siemiatyckim, sokólskim, łomżyńskim i wysokomazowieckim.



Rys. 1.2. Moc zainstalowana w poszczególnych rodzajach OZE w województwie podlaskim, w MW - stan na dzień 31 marca 2019 r. [opracowanie własne na podstawie danych uzyskanych od Urzędu Marszałkowskiego Województwa Podlaskiego]



Rys. 1.3. Procentowy udział odnawialnych źródeł energii w wybranych powiatach województwa podlaskiego - stan na dzień 31 marca 2019 r. [opracowanie własne na podstawie danych uzyskanych od Urzędu Marszałkowskiego Województwa Podlaskiego]

Zakłada się, że budowanie elektrowni biogazowych przyczyni się do ograniczenia efektu cieplarnianego, wzrostu bezpieczeństwa energetycznego regionu oraz zasobności portfeli polskich rolników [Mystkowski 2016]. Większość pracujących w kraju biogazowni charakteryzuje się mocą elektryczną od 0,5 do 1,5 MW [Gostomczyk 2017], co wynika z ekonomicznego kompromisu pomiędzy kosztami inwestycyjnymi a przyszłymi zyskami [Żmuda 2009]. Czas zwrotu inwestycji polegającej na budowie biogazowni rolniczej wynosi około 10 lat [Przesmycka 2016].

Integracja produkcji zwierzęcej z biogazownią rolniczą mogłaby być szczególnie korzystna dla małych i średnich gospodarstw rolnych. Umożliwiłaby ona wykorzystanie odpadów zwierzęcych, będących niejednokrotnie dodatkowym obciążeniem ekonomicznym

[Gorobets 2020, Yurchenko 2018] i środowiskowym [Sklyar A. i R. 2011] gospodarstwa. Pozwoliłoby to na zwiększenie opłacalności ekonomicznej i osiągnięcia własnego bezpieczeństwa energetycznego, a także przyczyniło się do realizacji krajowych celów niezależności energetycznej, regionalnej dyfuzji wytwarzania energii oraz zwiększenia liczby i mocy odnawialnych źródeł energii.

Biogazownią rolniczą nazywa się zespół powiązanych ze sobą urządzeń, które produkują, magazynują i przetwarzają biogaz (w najprostszej postaci przetworzenie biogazu polega na jego oczyszczeniu). Biogazownia rolnicza składa się głównie z [Romaniuk 2017]:

- zbiornika wstępnego do magazynowania substratu płynnego (gnojowicy),
- zbiornika na substrat stały, np. silosu na kiszonkę z kukurydzy,
- komory fermentacyjnej,
- zbiornika biogazu,
- agregatu kogeneracyjnego,
- zbiornika na masę pofermentacyjną,
- urządzeń pomocniczych (np. oczyszczaczy biogazu, automatyki regulacyjnej, podajników itp.).

Biogazownie rolnicze mają szereg zalet, wśród których należy wymienić [Wiśniewski 2008, Myczko 2011, Gołasa 2014, Nikiciuk 2017, Romaniuk 2017]:

- możliwość wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej zarówno na potrzeby własne gospodarstwa jak i na sprzedaż;
- wzrost bezpieczeństwa energetycznego regionu oraz kraju poprzez rozwój energetyki rozproszonej;
- powstanie nowych miejsc pracy;
- zmniejszenie kosztów utylizacji odpadów;
- redukcja emisji metanu oraz ditlenku węgla do atmosfery;
- możliwość wykorzystania lokalnych, niewykorzystywanych rolniczo zasobów energetycznych z biomasy np. roślin z traw niewykasanych rolniczo;
- produkcja paliwa w postaci sprężonego biogazu;
- uzyskanie pełnowartościowego nawozu w postaci pofermentu.

Pomimo tak wielu zalet związanych z pracą elektrowni biogazowych, występują również bariery związane z powstawaniem nowych biogazowni rolniczych, które można podzielić na 4 główne obszary [Krawiec 2010]:

- 1) bariery społeczne:

- negatywne postrzeganie przez lokalnych mieszkańców przyszłych inwestorów (głównie przez zazdrość – każdy liczy cudze pieniądze, nie widząc jednocześnie pracy występującej przy ich zarabianiu),
- obawy przyszłych inwestorów dotyczących reakcji okolicznej ludności – chęć znalezienia lokalizacji jak najdalej od siedzib ludzkich;

2) bariery organizacyjne:

- brak miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego na terenach inwestycyjnych, lub istniejące plany nie uwzględniają możliwości budowy tego typu infrastruktury;
- brak merytorycznego przygotowania urzędników do przepracowania takiego typu inwestycji i opieranie się często na niesprawdzonych a nawet nieprawdziwych informacjach dostępnych w Internecie;
- trudności w uzyskaniu wsparcia innych inwestorów, ze względu na niewielką liczbę pracujących biogazowni na terenie kraju,
- brak infrastruktury ciepłowniczej na obszarach wiejskich, utrudnia wykorzystanie ciepła powstałego w biogazowniach do ogrzewania gospodarstw domowych,
- brak łatwo dostępnego, wiarygodnego doradztwa inwestycyjnego;

3) bariery techniczne:

- pokusa inwestycji w duże biogazownie, które przynoszą wyższe przychody, jednakże wymagają zaangażowania dużo większego kapitału, oraz napotykać trudności z możliwością przyłączenia ich do sieci elektroenergetycznej;
- trudności w dopasowaniu technologicznym biogazowni do lokalnego rynku substratów;
- brak wykształconej kadry do obsługi biogazowni, dostępnej na rynku lokalnym, wymaga ciągłego inwestowania w zasoby ludzkie;
- spełnienie wymogów jakościowych dotyczących wytwarzanego biogazu oraz energii zależy często od jakości substratów oraz sprawności technologicznej urządzeń biogazowni;
- dość skomplikowany proces wytwarzania biogazu i energii w elektrowni, wymagający ciągłego monitorowania procesów w niej zachodzących;

4) bariery ekonomiczno-prawne:

- brak dofinansowań promujących ten rodzaj produkcji energii;
- wysokie koszty budowy biogazowni, a co za tym idzie długi okres zwrotu inwestycji;

- konieczność podporządkowania się wymaganiom jakościowym stawianym przez prawo oraz przedsiębiorstwa energetyczne;
- bardzo rozbudowana biurokracja, szczególnie na etapie budowy elektrowni.

Prawidłowy wybór lokalizacji biogazowni ma decydujący wpływ na opłacalność inwestycji oraz szybkość zwrotu poniesionych kosztów. W związku z tym w literaturze można spotkać wiele metod numerycznych wspomagających tę czynność, do których należą między innymi: AHP [Saaty i inni 2003], Promethee [Madlener i inni 2007], Vikor [San Cristobal 2011], metoda taksonomii numerycznej [Stoltmann i inni 2017]. Metody te bazują głównie na kryteriach związanych z dostępnością surowców, z dostępem do sieci elektroenergetycznej, odległości od terenów zurbanizowanych ze względu na hałas i uciążliwy zapach, itp. [Głaszczka i inni 2010] oraz uwzględniając wymagania opisane w Rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej [Rozporządzenie 1997].

Budowa biogazowni rolniczych może się różnić, głównie w zależności od profilu gospodarstwa, przy którym ona powstaje oraz od rodzaju substratów wykorzystywanych do produkcji biogazu. Dostępność i jakość substratu decyduje głównie o zdolności produkcyjnej biogazu, a możliwości odbioru pofermentu decydują o pojemności zbiorników pofermentacyjnych.

Konieczność magazynowania substratu niezbędnego do pracy biogazowni wiąże się z koniecznością budowy urządzeń niezbędnych do zrzutu i przechowywania materiałów wsadowych. Należą do nich zbiorniki na substraty płynne, głównie gnojowicę (najczęściej wykonywane jako podziemne) oraz silosy na substraty stałe (np. kiszonkę, obornik). W procesie kisenia dochodzi również do wstępnego rozkładu roślinnej materii organicznej, co skutkuje w przyszłości szybszym procesem fermentacji (w porównaniu do substratu surowego) [Kujawski 2009, Stegenta-Dąbrowska i inni 2020, Ermolaev 2012]. Z miejsc składowania wsad transportowany jest do komory fermentacyjnej. Do transportu substratów płynnych wykorzystuje się podajniki wirnikowe [PWIR 2021], wyporowe [PWYP 2021], miechowe [Scholwin i inni 2008]. Substraty składowane luzem transportowane są do podajnika materiału przy wykorzystaniu powszechnie dostępnych ładowarek kołowych [Block 2002]. Z podajnika do komory fermentacyjnej substrat przenoszony jest z wykorzystaniem zgarniaczy dennych lub listwowych [ZGD 2021], tłoków podających [TPO 2021] oraz przenośników ślimakowych [PSLIM 2021]. Zgarniacze mogą transportować niemal wszystkie składowane luzem substraty w płaszczyźnie poziomej lub z lekkim wzniesieniem, lecz nie umożliwiają one precyzyjnego dawkowania wsadu. Przenośniki

ślimakowe mogą przenosić materiał niemal we wszystkich kierunkach, pod warunkiem oczyszczenia go z dużych kamieni i kawałków materiału wsadowego. Przy wprowadzaniu biomasy z wykorzystaniem tłoka podającego, substrat kierowany jest najpierw do cylindra hydraulicznego, a z niego do komory fermentacyjnej. Wsad w większości przypadków kierowany jest do dolnej części komory fermentacyjnej, co ogranicza ryzyko powstawania w komorze kożucha fermentacyjnego. W celu uniknięcia zbijania substratu oraz równomiernego jego rozprowadzenia po komorze fermentacyjnej wykorzystuje się boczne lub pionowe [MIESZ1 2021, MIESZ2 2021] mieszadła szybkobieżne [MSZYB 2021], średnobieżne [MSR 2021] lub wolnobieżne [MWOL 2021]. Mieszadła mogą pracować w trybie interwałowym lub ciągłym [Gowin 2017]. Duże komory fermentacyjne wyposaża się najczęściej w kilka mieszadeł [Fischer 2004]. Do mieszania substratów w komorze fermentacyjnej mogą być również wykorzystywane pompy hydrauliczne, które włączają biogaz do zbiornika, powodując mieszanie jego zawartości [PHYD 2021].

Przebieg procesu fermentacji w komorze fermentacyjnej składa się z czterech faz: hydrolizy, acydofilnej, octanogennej i metanogennej, w których uczestniczą inne szczepy bakterii [Curkowski 2011]. Czas przebywania substratu w komorze fermentacyjnej (określany hydraulicznym czasem retencji HRT) powinien być dobrany optymalnie, aby umożliwić pełny rozkład substancji organicznych, i jednocześnie nie prowadzić do niepotrzebnego przewymiarowania komory fermentacyjnej i innych elementów biogazowni. Dla gnojowicy świńskiej czas hydrauliczny HRT wynosi zazwyczaj 15 dni, dla kiszonki kukurydzy 85 dni, a dla ich mieszanki (np. w proporcji 70 : 30) 65 dni. Liście buraków fermentują w czasie 14 dni, a słoma poźniwna nawet 78 dni [Lehtomäki 2006].

Bakterie metanowe najlepiej pracują w środowisku, w którym odczyn chemiczny pH zawiera się w przedziale 6,8–7,5 [Braun 1982], a bakterie hydrolizujące i kwasotwórcze przy pH od 4,5 do 6,3 [Wellinger i inni 1991]. W celu regulowania pH do substratu można dodać wapna lub świeżej gnojowicy. Zakłócenia w procesie wytwarzania metanu mogą wynikać nie tylko z niewłaściwego pH ale również z nadmiernej zawartości amoniaku (NH_3) oraz wystąpienia w zadawanym substracie antybiotyków lub środków ochrony roślin. Do innych substancji zakłócających proces fermentacji należą między innymi: potas (od 3 g/l), magnez (od 2,4 g/l), amoniak (od 0,15 g/dm³) i wapń (od 2,8 g/l) [Kaltschmitt 2001, Szlęk 2012, Szykowska 2009, Szykowska 2010]. Ponadto amoniak negatywnie oddziałuje na środowisko, powodując między innymi eutrofizację zbiorników wodnych oraz zakwaszenie gleb [Klemba 2015].

Zanim wytworzony w komorze fermentacyjnej biogaz zostanie przekształcony w energię cieplną, elektryczną lub biometan, musi przejść proces oczyszczania [Żarczyński i inni 2014]. Biogaz najczęściej oczyszczany jest z siarkowodoru i amoniaku [Cebula 2012, Pomykała i inni 2013, Jönsson 2003a, Jönsson 2003b], a w przypadku tłoczenia biogazu do gazociągu, z pary wodnej, ditlenku węgla oraz pozostałych zanieczyszczeń [Kowalski i inni 2012, Piskowska-Wasiak 2014]. Zbyt duże stężenie siarkowodoru wywołuje korozję i uszkodzenia urządzeń w biogazowni. Ponadto siarkowodor jest gazem wysoce trującym dla człowieka i w wysokim stężeniu może prowadzić go do śmierci [Manahan 2006, Stetkiewicz 2011]. Oddziałuje on na układ nerwowy i wywołuje inhibicję oksydazy cytochromowej niezbędnej do oddychania [Kośmider 2002].

Wykorzystanie biogazu wytworzonego w biogazowniach rolniczych do produkcji energii cieplnej i elektrycznej przynosi wiele korzyści [Dudek i inni 2015]:

- natury finansowej (szybsza stopa zwrotu inwestycji, obniżenie kosztów wykorzystania paliwa),
- środowiskowe (zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do atmosfery, zwiększenie sprawności źródła),
- prawne (uzyskanie certyfikatów pochodzenia energii).

Najnowsze rozwiązania technologiczne umożliwiają wytwarzanie więcej niż dwóch mediów w postaci prądu i ciepła. Systemy Trigeneracyjne umożliwiają produkcję energii elektrycznej, cieplnej oraz chłodniczej, a systemy Poligeneracyjne wytwarzają dodatkowo parę technologiczną [KOG 2021].

Poferment powstały w procesie produkcji biogazu ma zazwyczaj formę ciekłą i musi być składowany (do czasu jego wywozu jako nawóz naturalny lub do czasu dalszej obróbki – np. poprzez suszenie) na terenie biogazowni. Zbiornika na masę pofermentacyjną V_{pf} wyznacza się z zależności [Romaniuk i inni 2012]:

$$V_{pf} = \frac{M_s}{1,1 \cdot \rho_s \cdot T_{pf}} \quad (1.1)$$

w której: M_s – strumień masy substratu [Mg/d], ρ_s – gęstość właściwa substratu [Mg/m³], T_{pf} – okres przechowywania pofermentu [d], 1,1 – współczynnik uwzględniający objętość przestrzeni zajmowanej przez powietrze i osprzęt pomocniczy,

Odległość otwartych zbiorników na płynny poferment powinna wynosić co najmniej [Rozporządzenie 1997]:

- 1) 50 m od budynków służących przetwórstwu i magazynowaniu artykułów rolno-spożywczych;
- 2) 25 m od pomieszczeń mieszkalnych na działkach sąsiednich, jednak nie mniej niż 30 m od ich otworów okiennych i drzwiowych;
- 3) 10 m od budynków magazynowych pasz i ziarna oraz silosów na kiszonki;
- 4) 5 m od silosów na zboże i pasze;
- 5) 4 m od granicy działki sąsiedniej.

1.2. Substraty wykorzystywane w biogazowniach rolniczych

Do produkcji biogazu wykorzystuje się substraty roślinne, uboczne produkty przemiany materii i inne pozostałe odpady rolne i spożywcze (tabela 1.1.). Muszą one zapewniać stabilny przebieg procesu fermentacji oraz wysoką efektywność produkcji biogazu. Istotnym kryterium wyboru substratów wykorzystywanych w biogazowniach rolniczych jest również możliwość wykorzystania (np. jako nawóz naturalny - w postaci stałej lub płynnej) powstałej masy pofermentacyjnej – tzw. pofermentu [Cukrowski 2011]. Dlatego aktualnie do podstawowych składników substratu fermentacyjnego zaliczana jest gnojowica, pozostałości owoców i warzyw oraz kiszonka z kukurydzy.

Tabela 1.1. Wykaz wybranych surowców zużytych do produkcji biogazu rolniczego w Polsce w 2019 roku [Banasik 2020]

Rodzaj surowca	Ilość, w tys. Mg
Wywar pogorzelniany	817
Gnojowica	734
Kiszonka z kukurydzy	421
Wysłodki buraczane	250
Osady technologiczne z przemysłu rolno-spożywczego	188
Odpady z przemysłu mleczarskiego	125
Odpady z przetwórstwa spożywczego	120
Odpady poubojowe	104
Przeterminowana żywność	97
Nawóz naturalny	85
Odpadowa masa roślinna	42
Zielonka	33
Owoce i warzywa	30

Najbardziej powszechnym substratem odpadowym do biogazowni rolniczych jest gnojowica [Jędrejek 2015], której wytwarzana ilość zależy przede wszystkim od technologii utrzymania zwierząt – tabela 1.2. Jednakże, ze względu na niską zawartość substancji organicznych, najczęściej jest uzupełniana innymi substratami np. biomasą z upraw celowych, z których najbardziej wydajna jest kiszonka z kukurydzy [Michalski 2009].

Tabela 1.2. Możliwości produkcyjne biogazu z nawozu naturalnego [Linke 2009]

Substrat	Zawartość suchej masy organicznej, w %	Zawartość metanu, w %	Teoretyczna wydajność biogazu, w dm ³	
			z 1 kg suchej masy organicznej	z 1 kg świeżej masy
Gnojowica krów	75-82	50-55	200-500	20-30
Gnojowica świń	75-87	50-70	300-700	20-35
Gnojowica owiec	80-85	50-56	180-320	18-30
Obornik krów	68-78	55-60	210-300	40-55
Obornik świń	75-80	55-60	270-450	55-65
Pomiot kurzy świeży	63-80	57-70	250-450	70-90

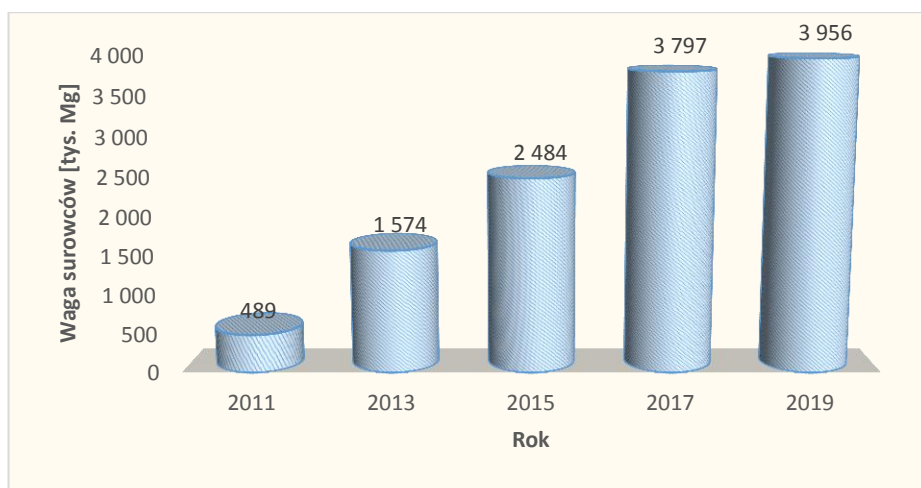
Kiszonka z kukurydzy charakteryzuje się jedną z największych możliwości produkcyjnych biogazu – tabela 1.3. Większą produktywnością z tony charakteryzuje się ziarno pszenicy, ale nie jest ono powszechnie stosowane, gdyż jest konsumpcyjnym, oraz posiada niską (w przeliczeniu na jeden hektar) produktywność gazową.

Tabela 1.3. Wydajność biogazu z kukurydzy w porównaniu z innymi roślinami [Jędrejek 2015]

Gatunek	Wydajność biogazu	
	[m ³ ·Mg ⁻¹]	[m ³ ·ha ⁻¹]
Kiszonka z kukurydzy	200	9 000
Zielonka z kukurydzy	175	8 750
Buraki pastewne	80	6 400
Ziemniaki	110	4 400
Trawa łąkowa	95	3 800
Ziarno pszenicy	600	3 600

Pierwsze polskie biogazownie rolnicze do produkcji biogazu wykorzystywały głównie gnojowicę uzupełnianą kiszonką z kukurydzy. Obecnie w elektrowniach biogazowych coraz częściej używa się dodatkowo produktów ubocznych i odpadowych z rolnictwa i przetwórstwa rolno-spożywczego. Mieszanka kilku substratów jednocześnie, nazywa się kofermentacją. W skład takiej mieszanki najczęściej wchodzi kiszonka kukurydziana (około

60%), gnojowica (około 30%) oraz odpady organiczne (około 10%). Sprzyja to uzyskaniu lepszych parametrów procesu fermentacyjnego (wzrost ilości wytworzonego biogazu), jak również zwiększa bezpieczeństwo zapewnienia dostaw surowca [Wiśniewski i inni 2008]. Wykorzystanie surowców do produkcji biogazu zwiększa się na przestrzeni ostatnich lat, głównie za sprawą ciągłego wzrostu liczby działających elektrowni – rysunek 1.4.



Rys. 1.4. Łączna ilość surowców zużytych do produkcji biogazu w latach 2011-2019 [Banasik i inni 2020]

Uzysk oraz skład biogazu zależy od wykorzystanych w biogazowni rolniczej substratów. Od nich zależą także charakterystyczne właściwości pofermentu, stanowiącego potencjalny nawóz naturalny. Znaczące ilości metali ciężkich, patogenów i inhibitorów fermentacji w substracie mogą spowodować nie tylko obniżenie wydajności instalacji biogazowej, ale także znacznie pogorszenie jakości pofermentu. Dlatego wykorzystanie w biogazowniach osadów ściekowych lub odpadów poubojowych może uniemożliwić zastosowanie pofermentu jako nawozu.

1.3. Wykorzystanie pofermentu jako nawozu naturalnego

Nawożenie polega na wprowadzaniu do gleby substancji mających na celu zwiększenie zawartości w niej składników pokarmowych niezbędnych roślinom do wzrostu oraz poprawienie właściwości chemicznych i fizycznych gleby. Rozróżnia się przy tym cztery rodzaje nawozów [Ustawa 2007, Kocoń 2012]:

- naturalne – nawóz naturalny od zwierząt gospodarskich, w postaci obornika, gnojówki, gnojowicy, przeznaczone do rolniczego wykorzystania;
- mineralne (nieorganiczne) – wyprodukowane w drodze przemian fizyko-chemicznych lub przerobu surowców mineralnych;

- organiczne – wyprodukowane z substancji organicznych i ich mieszanin (np. komposty);
- organiczno-mineralne – mieszaniny nawozów mineralnych i organicznych;

Wykorzystanie nawozów naturalnych w rolnictwie wpływa na poprawę uzyskanych plonów zarówno w aspekcie ilościowym jak i jakościowym. Wprowadzają one do gleby makroelementy (azot, fosfor, potas) oraz mikroelementy. Zastosowanie nawozów organicznych wpływa również na ograniczenie w roślinach występowania azotanów i azotynów. Azotany są związkami nieszkodliwymi dla zdrowia człowieka, jednak łatwo ulegają redukcji do bardziej toksycznych azotynów. W podwyższonej temperaturze azotyny reagują z drugo- i trzeciorzędowymi aminami, tworząc nitrozoaminy o działaniu mutagennym i kancerogennym [Rembiałkowska 2000, Gadomska i inni 2014]. Nawożenie organiczne wpływa na zwiększenie w roślinach zawartości węglowodanów, łatwo przyswajalnych białek oraz witamin z grupy B. W marchwi, ziemniakach, kapuście włoskiej, szpinaku, porach i w sałacie nawożonej nawozami organicznymi zaobserwowano również zwiększoną zawartość żelaza, magnezu, fosforu i potasu [Crinnion 2010].

Nawozy organiczne charakteryzują się zwykle niską zawartością arsenu, rtęci, ołowiu i innych metali ciężkich, w odróżnieniu od niektórych nawozów mineralnych [Singh i Pandey 2012, Arvaniti i inni 2006]. W tabeli 1.4 przedstawiono dopuszczalne w Polsce maksymalne zawartości metali ciężkich w nawozach organicznych. W przypadku ich przekroczenia takie nawozy się utylizuje, gdyż mogą zagrażać zarówno uprawom, jak i środowisku.

Tabela 1.4. Maksymalne stężenie metali ciężkich dopuszczalne w nawozach naturalnych [Łagocka i inni 2016]

Metal	Maksymalna zawartość
	[mg·kg ⁻¹]
Kadm	5
Chrom	100
Nikiel	60
Ołów	140
Rtęć	2

Właściwości chemiczne nawozu naturalnego różnią się od siebie i zależą głównie od użytej ściółki i rodzaju zwierząt - tabela 1.5.

W ostatnich latach coraz większym zainteresowaniem cieszą się ekologiczne produkty rolnicze. Produktów takich dostarczają gospodarstwa ekologiczne, w których maksymalnie ograniczono stosowanie chemicznych środków ochrony roślin i nawozów mineralnych. Jednym ze sposobów ograniczenia stosowania nawozów mineralnych jest zastąpienie ich masą pofermentacyjną powstałą w biogazowniach [Żelezik 2009]. Poferment zawierający materię organiczną oraz ważne związki mineralne jest nie tylko alternatywą dla nawozów mineralnych ale również może stanowić konkurencję dla nawozów naturalnych. Pozytywnym aspektem trawienia beztlenowego w procesie powstawania pofermentu jest fakt, że redukuje on patogeny, zabija wirusy, grzyby, bakterie z rodzaju *Listeria*, *Salmonella* i *Escherichia coli* oraz dezaktywuje nasiona roślin [Sahlström 2003, Sassi i inni 2018, Johansen i inni 2013, Zhou i inni 2020].

Tabela 1.5. Zawartość makro- i mikroelementów w nawozie naturalnym zwierząt gospodarskich [Kamiński i Markiewicz 2014]

Pochodzenie nawozu naturalnego	Makroelementy [%]					Mikroelementy [mg kg ⁻¹]				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	B	Cu	Mn	Mo	Zn
Bydło	0,47	0,29	0,67	0,45	0,16	4,46	4,46	64,65	0,29	34,60
Trzoda chlewna	0,49	0,71	0,68	0,44	0,16	3,60	5,38	63,22	0,33	48,51
Konie	0,54	0,29	0,95	0,45	0,16	3,51	3,36	70,41	0,25	25,91
Owce	0,76	0,40	1,25	0,61	0,21	5,81	5,14	84,22	0,34	32,37
Drób	1,20	0,79	0,80	0,73	0,21	9,59	8,73	76,63	0,52	66,60
Obornik mieszany	0,49	0,31	0,68	0,44	0,16	4,65	5,05	73,31	0,34	40,50

Pozostałości pofermentacyjne z biogazowni rolniczych mogą być traktowane jako odpad, ściek lub nawóz organiczny [Sołtysiak 2010]. W przypadku potraktowania pofermentu jako odpadu może on być rozprowadzany na powierzchni ziemi w celu nawożenia lub ulepszenia gleby [Ustawa 2001]. W przypadku traktowania pofermentu jako ściek należy go zagospodarować zgodnie z uzyskanym pozwoleniem wodnoprawnym w tym zakresie, przy spełnieniu norm sanitarnych i dopuszczalnych ilości zanieczyszczeń [Rozporządzenie 2019]. Jeśli poferment będzie traktowany jako nawóz, należy uzyskać pozwolenia na wprowadzenie go do obrotu, poprzez spełnienie wymagań Ustawy o nawozach i nawożeniu [Ustawa 2007]. Do nawozowych walorów pofermentu należy [Gołaszewski 2011]:

- duża aktywność biologiczna pożytecznej mikroflory;
- zneutralizowane działanie drobnoustrojów patogennych (np. *Salmonelli*);

- wysoka zawartość łatwo przyswajalnego azotu amonowego;
- ograniczenie zdolności kiełkowania nasion chwastów zawartych w pofermencie;
- brak zagrożenia dla wód gruntowych.

Wzbogacanie gleby o substancje organiczne poprzez stosowania nawożenia pofermentem wymaga od gospodarza posiadania znacznej wiedzy oraz dokładności w dozowaniu, ze względu na konieczność przestrzegania dopuszczalnych stężeń makroskładników [Rozporządzenie 2008]. W Tabeli 1.6 zestawiono dostępne w literaturze właściwości pofermentów uzyskanych z różnych mieszanin substratów. [Albuquerque i inni 2012]

Tabela 1.6. Podstawowe właściwości nawozowe pofermentów uzyskanych z wybranych mieszanin substratów [Albuquerque i inni 2012, Kowalczyk-Juśko 2013]

Poferment	Sucha masa	Azot ogólny	Azot NH ₄	P	K
	[%]	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]
gnojowica bydłęca – 100 %	5,1	5	3,3	1,8	6,5
kiszonka z kukurydzy – 70 % + gnojowica bydłęca – 30 %	9	5,8	3,8	2,3	9,1
kiszonka z kukurydzy – 40 % + gnojowica świńska – 60 %	6,3	5,5	3,6	2,6	5,2
kiszonka z kukurydzy – 85 % + gnojowica świńska – 10 % + ziarno pszenicy – 5 %	10,5	7,5	4,9	3,6	10,1
kiszonka z kukurydzy – 80 % + kiszonka z żyta – 20 %	10,9	7	4,6	2,8	11,1
gnojowica bydłęca – 84 % + gnojówka bydłęca – 4,4 % + kiszonka z owsa i kukurydzy – 11,6 %	3,1	4	2,4	0,8	3,1
gnojowica świńska – 94,6 % + pozostałości kukurydzy – 5,4 %	2,8	3,4	2,7	1,2	2,7
gnojowica świńska – 91,4 % + pozostałości rzepaku – 9,6 %	4,4	3,6	2,9	1,1	3,1
gnojowica świńska – 95,5 % + pozostałości słonecznika – 4,5 %	3,8	3,5	2,6	1,1	3,1

Poferment uzyskany z gnojowicy zwierzęcej ma odczyn zasadowy o pH około 7-8 [Albuquerque i inni 2012]. Najwyższą wartością nawozową charakteryzuje się poferment o największej zawartości nieorganicznej formy azotu (NH₄). Niestety forma ta jest nietrwała i może się szybko ulatniać w środowisku zasadowym. Azot w postaci NH₄ ulega szybko (w sprzyjających warunkach) nityfikacji, co ułatwia jego dostępność dla roślin. Niestety

możliwe jest też jego wymywanie w głąb profilu glebowego do wód gruntowych, stwarzające niebezpieczeństwo ich skażenia.

W celu wykazania zmian w składzie pofermentu, w stosunku do tradycyjnych nawozów organicznych przedstawiono w tabeli 1.7. zestawienie składów chemicznych poszczególnych substancji wykorzystywanych jako nawóz w rolnictwie.

Tabela 1.7. Zestawienie podstawowych składników chemicznych nawozów naturalnych [Baran 2011, Łagocka i inni 2016a]

Nawóz	Sucha masa	N	P ₂ O ₂	K ₂ O
	[%]	[g·kg ⁻¹ świeżej masy]		
Obornik	21-24	4,6-5,4	2,7-4,4	6,5-6,7
Gnojówka	3-5	1,2-3,5	0,1-0,2	2,8-8,0
Gnojowica	5-9,5	0,6-8,2	0,2-9,6	0,1-5,1
Poferment	4-7	3,0-5,0	1,0-1,5	3,5-5,5

Porównując skład nawozów organicznych z pofermentem można zauważyć, że poferment zawiera więcej azotu niż gnojowica, ale za to mniej potasu i fosforu niż nieprzetworzony nawóz naturalny. Rośliny są w stanie lepiej wykorzystać składniki zawarte w gnojowicy po jej przefermentowaniu. W porównaniu do surowych nawozów organicznych wykorzystanie to wzrasta z 50% do 75-80% [Kowalczyk-Juško i Szymańska 2015].

Poferment może być stosowany jako nawóz w postaci płynnej, jak i stałej. Faza stała powstaje najczęściej w wyniku mechanicznego lub termicznego oddzielenia wody z pofermentu. Zawartość makroelementów i mikroelementów w pofermencie stałym zależy od składu surowców wejściowych do procesu fermentacji oraz czasu retencji surowców w fermentorze [Abubaker 2012]. Zawartość suchej masy w fazie stałej pofermentu mieści się w zakresie 21–30% [Lukehurst 2010], a zawartość azotu w zakresie 2,2–3%, fosforu 1,9% i potasu 3,6% suchej masy części stałej pofermentu [Möller K. i T. 2012]. Ze względu na skład chemiczny i właściwości fizyczne, zastosowany poferment w postaci stałej może pozytywnie wpływać na plon biomasy i strukturę gleby [Makádi i inni 2008, Dubský i inni 2019].

Poferment w formie płynnej może być rozpatrywany jako rozcieńczony roztwór substratu zawierającego szeroką gamę składników odżywczych w postaci akceptowalnej dla roślin [Kolář 2012]. Zawartości mikroelementów dla części płynnej pofermentu wynoszą 7,7–9,2% dla azotu, 0,4–0,7% dla fosforu i 3,9% dla potasu [Möller K. i T. 2012]. Poferment

w postaci płynnej wydaje się być odpowiednim surowcem do stosowania na gruntach ornych w okresie wegetacji zarówno w aspekcie nawożenia, jak i ich nawadniania [Makádi 2012]. Sucha masa w pofermencie płynnym mieści się w zakresie 0,8–4%. Azot występuje głównie w formie mineralnej, o stężeniu 0,15-0,30%, co jest porównywalne z zawartością potasu. Ponieważ proporcje N–P–K są zmienne w każdym pofermentacie, konieczne jest przeprowadzenie analizy poszczególnych składników, przed faktycznym zastosowaniem takiego nawozu na polu [Coelho i inni 2018].

Najlepszy efekt plonotwórczy zostanie uzyskany, jeśli poferment będzie stosowany w dawkach wyliczonych według zasad sporządzania planu nawozowego. Pozwala to na precyzyjne wyliczenie ilości składników pokarmowych niezbędnych do wprowadzenia w pofermencie do poszczególnych gruntów. W tym celu najpierw należy wykonać analizę chemiczną gleby w celu określenia odczynu oraz zawartości przyswajalnych form fosforu (P), potasu (K), magnezu (Mg) oraz azotu mineralnego (N). Następnie, znając skład chemiczny pofermentu wyznacza się możliwość pokrycia wymagań pokarmowych poszczególnych gatunków roślin przy wykorzystaniu masy pofermentacyjnej oraz ewentualnie innych nawozów organicznych i mineralnych [Łabętowicz J. 2002]

Podsumowując, poferment jest niejednorodną cieczą powstającą jako produkt uboczny produkcji biogazu z materii organicznej, ze znacznym udziałem nierozłożonej stałej frakcji organicznej (60–80% w suchej masie). Sucha masa pofermentu mieści się w zakresie 7–12% i jest porównywalna z gnojowicą. Ma podobną zawartość azotu w świeżej masie jak nawóz naturalny (0,2–1%), ale wyższą wartość pH w zakresie 7–8 [Kratzeisen i inni 2010]. Stosowanie pofermentu na gruntach rolnych jako nawozu organicznego jest już uważane za standardowy sposób jego wykorzystania [Lijó i inni 2015, Teglia i inni 2011]. Badania pokazują, że wykorzystanie pofermentu z biogazowni rolniczych zmniejsza ryzyko środowiskowe, które generalnie wiąże się ze stosowaniem nawozów mineralnych, a jednocześnie pozwala uzyskać porównywalne parametry plonu upraw rolniczych. Jednocześnie należy podkreślić, że dostępność składników pokarmowych bardzo zależy od wykorzystywanych w biogazowni substratów i nie można jednoznacznie stwierdzić, że dzięki zastosowaniu produktów ubocznych fermentacji beztlenowej osiągnie się lepsze plony upraw polowych [Koszel i inni 2015, Tsachidou i inni 2019, Sogn i inni 2018].

Istnieje możliwość wykorzystania pofermentu jako nawozu w postaci stałej. Po wysuszeniu pofermentu odseparowywana jest frakcja stała, a odzyskana woda podlega procesom oczyszczania i może być ponownie wykorzystania w procesach technologicznych

biogazowni rolniczych. Poferment w postaci stałej może być dozowany jako nawóz sypki lub przetwarzany na formę granulatu (pelletu) - rysunek 1.5.



Rys. 1.5. Poferment w postaci granulatu (pelletu) [zdjęcie własne]

W celu określenia zawartości makroelementów w pofermencie przeprowadzono badania uzyskanego z niego pelletu (tabela 1.8). Poferment do badań uzyskano z biogazowni Wojny Wawrzyńce.

Tabela 1.8. Zawartość makroelementów w pofermencie w postaci pelletu [opracowanie własne]

Składnik	Zawartość
	[%]
Azot	1,57
Fosfor	0,43
Potas	1,0
Magnez	0,38
Wapń	2,23

1.4. Zdefiniowanie problemu

Niniejsza praca poświęcona jest zagadnieniom związanym z wytwarzaniem pofermentu w biogazowniach rolniczych oraz z jego późniejszym wykorzystaniem jako nawóz w uprawach rolniczych. Analizę wpływu pofermentu na efektywność produkcji rolniczej przeprowadzono na podstawie badań terenowych wykonanych w województwie

podlaskim. W pracy uwzględniono tematykę wytwarzania i wykorzystania pofermentu, przy uwzględnieniu czynników:

- Ekonomicznych:
 - Poferment jest materiałem uzyskiwanym z odpadów hodowlanych i gospodarczych, więc jest towarem darmowym.
 - Poferment jest odpadem w procesie uzyskiwania biogazu.
- Środowiskowych:
 - Poferment mniej oddziałuje na środowisko w porównaniu z nieprzetworzoną gnojowicą.
 - Związki zawarte w pofermencie są lepiej przyswajalne przez rośliny.
- Społecznych:
 - Poferment jest mniej uciążliwy odorowo.

Na podstawie analizy dostępnej literatury oraz dotychczasowych badań własnych sformułowany został problem badawczy w postaci następujących pytań:

1. Czy skład chemiczny pofermentu znacząco odbiega od składu wykorzystywanego w biogazowni substratu, a w szczególności gnojowicy?
2. Czy pozyskany substrat pofermentacyjny z produkcji biogazu jest przydatny do nawożenia roślin uprawnych?
3. Czy substrat pofermentacyjny z produkcji biogazu wymaga dodatkowych komponentów nawozowych i ewentualnie jakich?

1.5. Cel i zakres pracy

Cel pracy:

Analiza wpływu pofermentu z rolniczych instalacji biogazowych na efektywność produkcji rolniczej. Określenie możliwości wykorzystania pofermentu jako nawozu organicznego do nawożenia roślin uprawnych w gospodarstwach rolnych specjalizujących się w produkcji mleka w województwie podlaskim.

Zakres pracy obejmował:

1. Określenie substratów wykorzystywanych do produkcji biogazu (powstawania pofermentu).
2. Określenie właściwości pofermentu z różnych biogazowni.

3. Przeprowadzenie badań terenowych wpływu pofermentu na efektywność produkcji rolniczej.
4. Analiza otrzymanych wyników badań oraz zaproponowanie na ich podstawie rozwiązań (wytycznych) praktycznych.

Badania zostały wykonane w oparciu o dane pozyskane z dwóch biogazowni zlokalizowanych w województwie podlaskim w miejscowościach: Krasowo-Częstki (gmina Nowe Piekuty) oraz Michałowo (gmina Michałowo). W ramach przeprowadzonych badań zostały przebadane właściwości chemiczne próbek pofermentu, m.in.: pH, sucha masa, azot ogólny, N-NH₄⁺, fosfor ogólny, potas ogólny oraz makro i mikrośladniki. Uzyskane wyniki zostały poddane analizie statystycznej. Pozyskane po fermentacji metanowej masy pofermentacyjne zostały wykorzystane w badaniach terenowych na roślinach testowych.

2. Metodyka badań

W celu znalezienia odpowiedzi na postawione pytania w sformułowanym problemie wykonane zostały badania terenowe na obiektach położonych w województwie podlaskim. Badania te można było podzielić na następujące etapy:

1. Wykonanie badań składu chemicznego substratów znajdujących się w biogazowni rolniczej. Badania te prowadzono przez okres dwóch lat pobierając co miesiąc (oprócz miesięcy zimowych) próbki do badania (w pierwszym roku badań pobrano 8 próbek, a w drugim 7). Za każdym razem pobierano łącznie trzy próbki: jedną ze zbiornika na gnojowicę, drugą z mieszalnika substratów podawanych do biogazowni, a trzecią ze zbiornika na poferment. Wszystkie te próbki przekazywano do certyfikowanego laboratorium celem określenia ich składu chemicznego.
2. Wykonanie badań składu chemicznego pofermentu wykorzystanego do nawożenia poletek badawczych. Próbki do badań pobierano ze zbiornika na poferment dwukrotnie (po razie w każdym roku) bezpośrednio przed załadunkiem pofermentu, w celu dostarczenia go i wykorzystania na poletkach badawczych.
3. Przeprowadzenie dwuletnich badań wpływu pofermentu na rozwój kukurydzy odmiany Vistula i porównaniu ich z innymi metodami nawożenia. W każdym roku badania terenowe przeprowadzane były na pięciu poletkach badawczych w trzech powtórzeniach. Rozmieszczenie poszczególnych pól generowane było losowo. W każdym poletku badawczy stosowano inny system nawożenia: poferment, poferment + NPK, poferment + NPK + mikroelementy, NPK, NPK + mikroelementy. Na każdym poletku monitorowana była między innymi wysokość całkowita rośliny oraz wysokość osadzenia najniższej kolby. Ponadto ocenie podlegała kondycja i zdrowotność rośliny oraz odporność na wybrane choroby. Szczegółowy opis pola badawczego przedstawiony został w rozdziale 2.2.
4. Wykonanie analiz otrzymanych wyników badań oraz wyciągnięcie wniosków z otrzymanych zależności. Analiza statystyczna zebranych wyników została wykonana przy pomocy pakietu statystycznego STATISTICA v. 13.3. Wybrane korelacje poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem testu ANOVA, a następnie post – hoc test Tukeya. Zmienne poddano analizie korelacji, a dla wybranych wygenerowano wykres rozrzutu. Poziom istotności przyjęto dla $\alpha = 0,05$, wyniki uznawano za istotne statystycznie, gdy wartość $p \leq 0,05$.

2.1. Opis technologii biogazowni rolniczej

Poferment do nawożenia kukurydzy pozyskany został z biogazowni rolniczej zlokalizowanej w województwie podlaskim. Ilość substratów zużywanych średniorocznie przez biogazownię zestawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Zestawienie substratów wykorzystywanych w badanych biogazowniach [badania własne].

Substrat	Wykorzystanie w biogazowni	
	t (m ³) · rok ⁻¹ (brutto)	t (m ³) · dzień ⁻¹ (netto)
Kiszonka z kukurydzy	10 050	25,61
Gnojowica bydłęca	6 800	18,63
Obornik bydłęcy	5 000	13,70
Woda	300 m ³ · rok ⁻¹ (dodatek w celu rozrzedzenia masy fermentacyjnej)	

Stężenie azotu w substratach wejściowych nie są wysokie i nie powodują problemów technologicznych. Siarka zawarta w gnojowicy, z technologicznego punktu widzenia, nie powoduje problemów, ponieważ zostanie „rozpuszczona” w kiszonce kukurydzianej. W tym przypadku odsiarczanie biologiczne jest wystarczające. Surowce (kiszonka kukurydzy, obornik bydłęcy) doprowadzane są bezpośrednio do fermentora za pomocą dozownika substratów stałych (rys. 2.1). Gnojowica bydłęca pompowana jest do fermentora z pojazdów asenizacyjnych, a woda poprzez wodociągi wchodzące do zbiornika. Fermentor połączony jest za pomocą pompy ze zbiornikiem magazynowym pofermentacyjnym. Gdy substrat fermentacyjny wprowadzany jest do fermentora, tą samą ilość pompa przepompowuje do zbiornika magazynowego pofermentacyjnego.

Aby nie dopuścić do powstania kożucha pływającego na powierzchni i aby uzyskać homogeniczny, dobrze wymieszany substrat, fermentor posiada nastawialne mieszadła zatapialne. Mieszadła zapewniają pompowanie i wymieszanie substratu również wtedy, gdy zawartość suchej masy jest wysoka.

Sterowanie temperatury i przebiegu procesu w fermentorze odbywa się za pomocą obwodowego ogrzewania ściennego. Zamocowane na wewnętrznej ścianie zbiornika uchwyty dystansowymi przewody PE służą do ogrzewania zbiornika i są zasilane ciepłą

wodą z jednostki kogeneracyjnej. 10-cio centymetrowy odstęp pomiędzy przewodem a ścianą zapewnia statycznie bezproblemowe równomierne ogrzanie zbiornika.

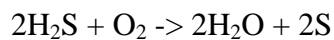


Rys. 2.1. Dozownik automatyczny substratu stałego [zdjęcie własne]

Anaerobową produkcję biogazu wykonują bakterie metanowe podczas biologicznego rozkładu substancji organicznej bez dostępu tlenu i światła w określonym zakresie temperatury. Temperatura fermentacji i średni czas przebywania są głównymi parametrami procesu anaerobowego. Zaprojektowana biogazownia pracuje w zakresie mezofilnym przy ok. 40 °C. Przy wystarczająco długo trwającej fermentacji biomasy dochodzi do higienizacji i stabilizacji substratów.

Poprzez dostarczanie biomasy do odbywającego się nieprzerwanie procesu biogazowego, co równocześnie oznacza dopływ substancji odżywczych dla bakterii metanowych, uzyskiwany jest bogaty w energię biogaz. Anaerobowy proces fermentacyjny i produkcja gazu jest kontrolowana i prowadzona przez dopływ substancji odżywczych. Powstający biogaz zawiera do 75 % metanu. Dodatkowo biogaz składa się przede wszystkim z ditlenku węgla, wody i siarkowodoru. Zanim surowy gaz będzie energetycznie wykorzystany, musi

zostać fizycznie odwodniony i biologicznie odsiarczony. Odwodnienie biogazu przed jego energetycznym zużyciem służy utrzymaniu stałej wartości opałowej, co zwiększa sprawność energetycznego zużycia i zapobiega spadkom ciśnienia w systemie rurociągu gazu oraz zapobiega korozji. Aby skondensować zawartą w surowym gazie wodę, linia gazu jest schładzana. W ten sposób po przekroczeniu punktu skraplania woda zostanie fizycznie skondensowana. Kondensat zostaje wprowadzony do zbiornika pofermentacyjnego jako woda procesowa. W celu wytrącenia siarkowodoru wdmuchiwane jest do surowego gazu powietrze a następnie zachodzi reakcja:



Pozostająca na powierzchni substratu siarka poprawia jakość nawozu. Odsiarczony surowy gaz zostaje odprowadzony z niskociśnieniowego zbiornika magazynowego gazu nad fermentorem do dalszego energetycznego wykorzystania.



Rys. 2.2. Zbiornik na poferment w postaci ciekłej [zdjęcie własne]

Zbiornik magazynowy pofermentacyjny z niskociśnieniowym zbiornikiem magazynowym gazu ponad poziomem substratu jest zbudowany jako okrągły zbiornik z żelbetu, według ogólnie uznanych reguł techniki i polskich norm (rys. 2.2.). Posiada on samonośne przykrycie pneumatyczne i jest wyposażony w mieszadła zatapialne zapobiegające powstawaniu kożuchów pływających na powierzchni oraz ujednolicające i mieszające sfermentowany substrat. Zbiornik ten służy jako dodatkowy zbiornik buforowy gazu do wyrównania strumienia gazu w sieci gazowej. Średni czas przebywania pofermentu w zbiornikach magazynowych pofermentacyjnych wynosi ok. 4 miesięcy.

Do odbioru masy pofermentacyjnej ze zbiornika zostało zbudowane stanowisko załadunku wraz z instalacją napelniającą oraz instalacją dozującą gnojowicę. Stanowisko załadunku wykonano jako betonową płytę najazdową o powierzchni zmywalnej, wyposażoną w:

- rurociągi odbiorcze
- studzienkę betonową, bezodpływową z płytą przykrywającą.

Studzienka służy do odprowadzania wycieków podczas odbioru pozostałości pofermentacyjnej. Na rysunku 2.3 przedstawiono widok biogazowni rolniczej Michałowo, widzianej z góry.



Rys. 2.3. Widok z góry na Biogazownię Michałowo [zdjęcie własne]

2.2. Opis pola badawczego

Do badań wykorzystano pole badawcze o powierzchni 2700 m² podzielone na 15 poletek badawczych, po 180 m² każde (o wymiarach 6x30 m). Doświadczenie polowe wykonano w oparciu o niezależny układ losowanych bloków. W każdym roku przedplonem było pszenżyto ozime. Jako roślinę badaną wybrano kukurydzę odmiany Vistula (FAO 210-220). Do ochrony herbicydowej wykorzystano Lumax 537,5 SE (w dawce 3,5 l/ha) oraz Elumis 105 OD (w dawce 1,5 l/ha). Do badań przyjęto pięć różnych sposobów nawożenia poletek:

1. Poletko nawożone pofermentem (w dawce 40 t na 1 ha).
2. Poletko nawożone pofermentem (w dawce 40 t na 1 ha) oraz nawozem NPK (w dawce: N – 87,0 kg na 1 ha, P – 60 kg na 1 ha, K – 90 kg na 1 ha).
3. Poletko nawożone pofermentem (w dawce 40 t/ha), nawozem NPK (w dawce: N – 87,0 kg na 1 ha, P – 60 kg na 1 ha, K – 90 kg na 1 ha) oraz mikroelementami (w postaci Plonvitu NPK w dawce 3,0 l na 1 ha).
4. Poletko nawożone nawozem NPK (w dawce: N – 140,0 kg na 1 ha, P – 42 kg na 1 ha, K – 119 kg na 1 ha).
5. Poletko nawożone nawozem NPK (w dawce: N – 140,0 kg na 1 ha, P – 42 kg na 1 ha, K – 119 kg na 1 ha) oraz mikroelementami (w postaci Plonvitu NPK w dawce 3,0 l na 1 ha).

Każde poletko występowało w trzech powtórzeniach. Układ poletek przedstawiono na rysunku 2.4 oraz w tabeli 2.1.



27



Rys. 2.4. Schemat poletek doświadczalnych w kolejnych latach [opracowanie własne]

Tab. 2.1. Tabela sposobów nawożenia poletek doświadczalnych w kolejnych latach [opracowanie własne]

Nr bloku	Nr sposobu nawożenia poletka				
1 rok badań					
1	4	1	3	2	5
2	2	5	4	3	1
3	1	3	5	4	2
2 rok badań					
1	4	3	2	1	5
2	1	2	5	4	3
3	3	4	1	5	2

Siew kukurydzy na poletkach badawczych wykonano w dniach 18.05.2021 roku oraz 16.05.2022 roku. Nawozy oraz poferment aplikowane były za każdym razem w dniu siewu. Zbiory odbyły się odpowiednio: 23.09.2021 roku oraz 26.09.2022 roku. Przeprowadzona analiza gleby przed zastosowaniem nawozów wykazała w pierwszym roku badań następujące parametry: pH - 6,7; P₂O₅ -13,2 mg na 100 g gleby; K₂O - 22,0 mg na 100 g gleby; Mg - 5,7 mg na 100 g gleby. Natomiast w drugim roku badań było to: pH - 6,7; P₂O₅ -13,8 mg na 100 g gleby; K₂O - 20,8 mg na 100 g gleby; Mg - 5,4 mg na 100 g gleby. Po zbiorze kukurydzy, na polach z zastosowanym pofermentem skład gleby był następujący: pH - 6,7; P₂O₅ -14,4 mg na 100 g gleby; K₂O - 16,0 mg na 100 g gleby; Mg - 5,0 mg na 100 g gleby w pierwszym roku badań oraz pH - 6,7; P₂O₅ -14,0 mg na 100 g gleby; K₂O - 14,9 mg na 100 g gleby; Mg - 4,9 mg na 100 g gleby w drugim roku. Zdjęcia z przykładowych etapów wzrostu kukurydzy przedstawiono na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Badana kukurydza w poszczególnych fazach wzrostu [zdjęcie własne]

3. Wyniki badań pofermentu i ich omówienie

W celu określenia ilości pierwiastków dostarczanych do roślin podczas ich nawożenia pofermentem, zostały wykonane badania składu chemicznego pofermentu, którym zostały później zasilone rośliny na polach badawczych. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Wyniki badań składu chemicznego pofermentu, wykorzystywanego do nawożenia badanych roślin [Badania własne]

Rok badań	-	1	2
Sucha masa	%	4,71	4,86
Sucha masa organiczna	%	73,58	76,4
Wapń Ca	g·kg ⁻¹ ś.m.	34,1	24,7
Magnez Mg	g·kg ⁻¹ ś.m.	10,4	11,17
Sód Na	g·kg ⁻¹ ś.m.	10,3	8,52
Fosfor P	g·kg ⁻¹ ś.m.	11,2	9,24
Potas K	g·kg ⁻¹ ś.m.	51,5	49,9
Molibden Mo	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,24	2,91
Kobalt Co	mg·kg ⁻¹ ś.m.	1,94	1,83
Mangan Mn	g·kg ⁻¹ ś.m.	0,333	0,362
Cynk Zn	mg·kg ⁻¹ ś.m.	401	398
Ołów Pb	mg·kg ⁻¹ ś.m.	3,65	3,44
Kadm Cd	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,325	0,328
Chrom Cr	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,78	2,98
Miedź Cu	mg·kg ⁻¹ ś.m.	167	167,7
Nikiel Ni	mg·kg ⁻¹ ś.m.	8,08	7,98
Azot N	% ś.m.	3,1	2,8
Węgiel C	% ś.m.	40	39
Rtęć Hg	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,019	0,016
Azot amonowy NNH4	mg·kg ⁻¹ ś.m.	931	834

W analizowanej biogazowni rolniczej oprócz pofermentu w formie ciekłej, wytwarzany jest poferment w formie granulatu. Granulat otrzymywany jest w procesie suszenia pofermentu, który jest następnie wytlaczany w granulatorze. W celu określenia różnic w składzie obu struktur pofermentu zostały przeprowadzone badania laboratoryjne, których wyniki przedstawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Wyniki badań składu chemicznego pofermentu w formie ciekłej i stałej, [Badania własne]

Pierwiastek	Jednostka	Poferment	Poferment granulowany	Odchylenie standardowe	Procentowa różnica
Wapń Ca	g·kg ⁻¹ ś.m.	29,4	31,2	0,90	6,12
Magnez Mg	g·kg ⁻¹ ś.m.	10,79	10,77	0,01	-0,19
Sód Na	g·kg ⁻¹ ś.m.	9,41	10,01	0,30	6,38
Fosfor P	g·kg ⁻¹ ś.m.	10,22	11,3	0,54	10,57
Potas K	g·kg ⁻¹ ś.m.	50,7	50,9	0,10	0,39
Molibden Mo	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,575	2,11	0,23	-18,06
Kobalt Co	mg·kg ⁻¹ ś.m.	1,89	1,99	0,05	5,29
Mangan Mn	g·kg ⁻¹ ś.m.	0,35	0,31	0,02	-11,43
Cynk Zn	mg·kg ⁻¹ ś.m.	399,5	412,1	6,30	3,15
Ołów Pb	mg·kg ⁻¹ ś.m.	3,55	3,21	0,17	-9,58
Kadm Cd	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,33	0,33	0,00	0,00
Chrom Cr	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,88	2,99	0,06	3,82
Miedź Cu	mg·kg ⁻¹ ś.m.	167,35	174,6	3,63	4,33
Nikiel Ni	mg·kg ⁻¹ ś.m.	8,03	7,48	0,27	-6,85
Azot N	% ś.m.	2,95	2,78	0,09	-5,76
Węgiel C	% ś.m.	39,5	37,6	0,95	-4,81
Rtęć Hg	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,0175	0,0178	0,00015	1,71
Azot amonowy NNH4	mg·kg ⁻¹ ś.m.	882,5	892,3	4,90	1,11

Z analizy wartości zawartych w tabeli 3.2. wynika, że skład chemiczny pofermentu nie zależy znacząco od jego struktury. Największa zarejestrowana różnica dotyczy molibdenu, przy czym przekracza ona nieznacznie jedynie 18 %. W związku z tym, że skład chemiczny pofermentu granulowanego nie odbiega znacząco do składu pofermentu ciekłego, a koszt uzyskania granulatu jest znaczący, poferment granulowany wykorzystywany jest w większości przypadków jedynie w ogródkach (jako łatwiejszy w stosowaniu). W związku ze znacznym rozwojem technologii dawkowania nawozów w formie ciekłej, do nawożenia gruntów rolnych wykorzystywany jest w praktyce poferment nieprzetworzony. Jest on bowiem kilkukrotnie tańszy od pofermentu granulowanego oraz dostarcza dodatkową wilgoć do gleby, co ma znaczenie w występujących ostatnio suszach glebowych. Dostępne maszyny rolnicze pozwalają ponadto dokładnie ustawić dawkowanie pofermentu. Dlatego do dalszych badań wybrano poferment w formie ciekłej.

W celu określenia, czy skład wykorzystywanego do nawożenia badanych upraw pofermentu nie odbiegał od standardowego składu pofermentu występującego w przeciągu okresu nawożenia roślin, wykonane zostały badania składu pofermentu w analizowanej

biogazowni. Badania wykonywano przez okres dwóch lat, pobierając próbki raz w miesiącu (poza miesiącami zimowymi). Łącznie pobrano 15 próbek (8 w pierwszym roku i 7 w drugim roku badań). Wyniki badań przedstawiono w tabelach 3.3. i 3.4.

Tabela 3.3. Wyniki badań składu chemicznego pofermentu, wykonane w 1 roku badań [badania własne]

Nr badania		1	2	3	4	5	6	8
Sucha masa	%	2,81	3,21	2,94	4,12	5,14	6,11	3,80
Sucha masa organiczna	%	77,1	70,2	68,9	72,5	74,5	72,2	73,8
Wapń Ca	g·kg ⁻¹ ś.m.	44,1	24,7	22,5	30,5	58,1	29,8	28,5
Magnez Mg	g·kg ⁻¹ ś.m.	10,4	9,17	12,8	9,59	30,4	11,2	12,0
Sód Na	g·kg ⁻¹ ś.m.	10,3	8,52	8,40	8,23	7,57	8,44	12,7
Fosfor P	g·kg ⁻¹ ś.m.	11,2	9,24	11,1	10,1	9,38	11,1	12,6
Potas K	g·kg ⁻¹ ś.m.	51,5	43,9	33,2	46,2	34,8	40,0	43,0
Molibden Mo	mg·kg ⁻¹ ś.m.	3,24	1,91	1,75	2,30	2,58	2,94	3,01
Kobalt Co	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,04	1,73	0,863	2,65	1,87	2,28	1,72
Mangan Mn	g·kg ⁻¹ ś.m.	0,353	0,342	0,289	0,411	0,673	0,404	0,291
Cynk Zn	mg·kg ⁻¹ ś.m.	601	338	259	503	475	488	255
Ołów Pb	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,65	2,44	4,86	5,70	4,78	5,28	3,52
Kadm Cd	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,315	0,228	0,312	0,387	0,793	0,414	0,255
Chrom Cr	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,76	2,78	2,24	1,49	5,75	6,62	1,71
Miedź Cu	mg·kg ⁻¹ ś.m.	367	67,7	65,6	282	67	257	122
Nikiel Ni	mg·kg ⁻¹ ś.m.	8,78	4,98	6,36	6,72	10,5	7,59	6,32
Azot N	% ś.m.	3,0	2,6	2,8	2,8	2,3	3,7	4,0
Węgiel C	% ś.m.	40	39	40	40	35	38	40
Rtęć Hg	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,020	0,015	0,012	0,011	0,013	0,022	0,012
Azot amonowy NNH4	mg·kg ⁻¹ ś.m.	931	1634	1047	1360	824	1331	582

Tabela 3.4. Wyniki badań składu chemicznego pofermentu, wykonane w 2 roku badań [badania własne].

Nr badania		9	10	11	12	13	14	15
Sucha masa	%	7,5	5,2	1,9	6,6	7,78	4,11	2,99
Sucha masa organiczna	%	80,6	74,1	62,8	73,7	77,2	69,10	73,22
Wapń Ca	g·kg ⁻¹ ś.m.	27,9	15,8	37,1	35,8	29,7	27,0	21,4
Magnez Mg	g·kg ⁻¹ ś.m.	7,77	6,43	8,97	12,0	10,8	8,62	11,6
Sód Na	g·kg ⁻¹ ś.m.	9,18	7,65	21,5	11,1	24,6	7,97	8,02
Fosfor P	g·kg ⁻¹ ś.m.	8,99	8,46	12,9	9,04	10,5	8,85	11,0
Potas K	g·kg ⁻¹ ś.m.	24,3	39,1	70,3	38,9	86,7	72,8	56,0
Molibden Mo	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,91	3,01	3,02	2,10	4,03	2,08	1,88
Kobalt Co	mg·kg ⁻¹ ś.m.	1,10	0,732	1,20	2,62	3,59	0,955	2,75
Mangan Mn	g·kg ⁻¹ ś.m.	0,288	0,188	0,224	0,516	0,199	0,229	0,324
Cynk Zn	mg·kg ⁻¹ ś.m.	311	171	234	651	343	278	411
Ołów Pb	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,80	2,87	3,46	4,75	2,20	2,01	2,88
Kadm Cd	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,268	0,235	0,264	0,301	0,202	0,240	0,386

Chrom Cr	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,38	4,34	2,44	3,15	1,97	2,10	3,27
Miedź Cu	mg·kg ⁻¹ ś.m.	321	56,5	86,7	185	53,9	118	199
Nikiel Ni	mg·kg ⁻¹ ś.m.	10,5	6,13	6,45	15,2	7,60	6,34	6,92
Azot N	% ś.m.	3,6	3,3	4,4	3,2	3,0	3,1	3,2
Węgiel C	% ś.m.	40	39	40	40	35	38	40
Rtęć Hg	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,020	0,015	0,012	0,011	0,013	0,022	0,012
Azot amonowy NNH ₄	mg·kg ⁻¹ ś.m.	931	1634	1047	1360	824	1331	582

Z analizy wartości podanych w tabelach 3.3 oraz 3.4 wynika, że skład pofermentu wykorzystanego do nawożenia badanych pól doświadczalnych nie odbiegał znacząco od próbek pobranych w przeciągu dwóch lat pracy biogazowni. W celu określenia, czy proces fermentacyjny znacząco wpływa na zmianę ilości poszczególnych pierwiastków zawartych we wsadzie, wykonano badania składu chemicznego wsadu (biomasy). Próbki pobierano 7 dni, przed datą pobierania do badania próbek pofermentu. Wyniki badań przedstawiono w tabelach 3.5 i 3.6.

Tabela 3.5. Wyniki badań składu chemicznego wsadu (wykorzystanych substratów), wykonane w 1 roku badań [badania własne].

Nr badania		1	2	3	4	5	6	7	8
Sucha masa	%	4,92	5,89	3,81	4,11	4,98	5,12	3,72	3,84
Sucha masa organiczna	%	75,9	77,2	70,6	78,6	74,2	76,8	73,8	75,8
Wapń Ca	g·kg ⁻¹ ś.m.	42,4	29,2	24,5	25,6	50,7	27,6	27,6	33,2
Magnez Mg	g·kg ⁻¹ ś.m.	11,2	10,7	12,2	8,73	26,0	16,2	11,7	11,7
Sód Na	g·kg ⁻¹ ś.m.	9,03	9,42	7,56	5,76	7,85	19,9	13,3	9,04
Potas K	g·kg ⁻¹ ś.m.	42,4	49,0	30,6	32,5	33,1	94,8	44,3	35,3
Fosfor P	g·kg ⁻¹ ś.m.	12,0	10,8	10,5	11,0	8,88	9,09	12,6	12,2
Żelazo Fe	g·kg ⁻¹ ś.m.	1,32	1,91	1,02	0,728	2,07	0,929	1,32	1,34
Siarka S	g·kg ⁻¹ ś.m.	7,82	6,08	4,94	6,53	6,56	6,26	7,27	6,97
Molibden Mo	mg·kg ⁻¹ ś.m.	3,01	2,02	1,75	1,75	2,91	3,68	3,27	1,75
Kobalt Co	mg·kg ⁻¹ ś.m.	1,79	1,80	0,642	2,08	1,96	2,33	1,97	0,644
Mangan Mn	g·kg ⁻¹ ś.m.	0,369	0,397	0,277	0,398	0,536	0,377	0,294	0,148
Cynk Zn	mg·kg ⁻¹ ś.m.	389	438	215	411	534	399	280	420
Ołów Pb	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,50	48,5	8,63	2,11	4,9	3,51	2,71	11,3
Kadm Cd	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,284	0,502	0,495	0,317	0,821	0,272	0,241	0,463
Chrom Cr	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,72	2,67	2,26	1,99	3,24	1,95	2,01	1,99
Miedź Cu	mg·kg ⁻¹ ś.m.	360	103	45,8	197	78,1	204	135	82,1
Nikiel Ni	mg·kg ⁻¹ ś.m.	9,04	7,17	6,53	7,01	11,7	8,60	7,3	7,21
Azot N	% ś.m.	2,5	2,6	2,4	3,1	2,3	2,2	3,9	3,8
Węgiel C	% ś.m.	39	39	43	41	36	35	40	41
Rtęć Hg	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,020	0,017	0,012	0,015	0,013	0,021	0,014	0,016
Azot amonowy NNH ₄	mg·kg ⁻¹ ś.m.	1079	1040	968	1274	680	937	713	593
Siarczany SO ₄ ²⁻	mg·kg ⁻¹ ś.m.	1754	905	791	370	190	700	1343	998

Tabela 3.6. Wyniki badań składu chemicznego wsadu, wykonane w 2 roku badań [badania własne].

Nr badania		9	10	11	12	13	14	15
Sucha masa	%	5,4	5,8	2,6	7,8	5,61	3,86	4,8
Sucha masa organiczna	%	78,4	76,4	69,3	78,6	74,8	66,7	79,9
Wapń Ca	g·kg ⁻¹ ś.m.	24,0	15,1	34,4	28,0	38,5	28,4	20,3
Magnez Mg	g·kg ⁻¹ ś.m.	8,12	5,78	8,64	10,0	11,7	8,49	10,2
Sód Na	g·kg ⁻¹ ś.m.	10,5	6,57	14,2	11,3	12,1	4,32	4,72
Potas K	g·kg ⁻¹ ś.m.	29,1	35,7	47,3	30,1	46,5	31,7	36,1
Fosfor P	g·kg ⁻¹ ś.m.	8,92	8,0	12,6	8,49	13,8	13,1	9,42
Żelazo Fe	g·kg ⁻¹ ś.m.	0,735	2,73	1,23	0,722	1,22	0,957	1,25
Siarka S	g·kg ⁻¹ ś.m.	7,28	5,17	7,78	6,32	6,47	5,04	6,87
Molibden Mo	mg·kg ⁻¹ ś.m.	3,11	2,96	2,71	1,75	3,56	1,80	1,75
Kobalt Co	mg·kg ⁻¹ ś.m.	1,19	1,01	1,09	1,68	3,16	0,575	2,23
Mangan Mn	g·kg ⁻¹ ś.m.	0,29	0,195	0,22	0,405	0,29	0,226	0,3
Cynk Zn	mg·kg ⁻¹ ś.m.	310	184	230	499	387	201	375
Ołów Pb	mg·kg ⁻¹ ś.m.	3,31	3,36	4,41	4,50	3,01	2,85	3,69
Kadm Cd	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,265	0,252	0,237	0,249	0,197	0,223	0,375
Chrom Cr	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,56	4,61	2,38	1,76	5,20	2,08	3,15
Miedź Cu	mg·kg ⁻¹ ś.m.	303	120	119	139	62,7	61,3	248
Nikiel Ni	mg·kg ⁻¹ ś.m.	15,2	9,31	7,60	10,1	11,3	4,77	8,56
Azot N	% ś.m.	3,3	3,4	4,8	3,0	3,1	3,3	3,2
Węgiel C	% ś.m.	42	42	39	41	39	40	40
Rtęć Hg	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,016	0,019	0,017	0,012	0,015	0,015	0,014
Azot amonowy NNH4	mg·kg ⁻¹ ś.m.	328	323	196	309	1427	493	563
Siarczany SO ₄ ²⁻	mg·kg ⁻¹ ś.m.	659	798	1356	239	1120	129	618

Ponieważ do nawożenia pól uprawnych wykorzystywana jest gnojowica, przeprowadzono badania gnojowicy wykorzystywanej w procesie fermentacyjnym badanej biogazowni. Uzyskane wyniki umożliwią porównanie składu chemicznego gnojowicy do składu pofermentu. Próbkę gnojowicy, podobnie jak próbki biomasy, pobierane były 7 dni przed terminem pobierania próbek pofermentu. Uzyskane wyniki badań przedstawiono w tabelach 3.7 i 3.8.

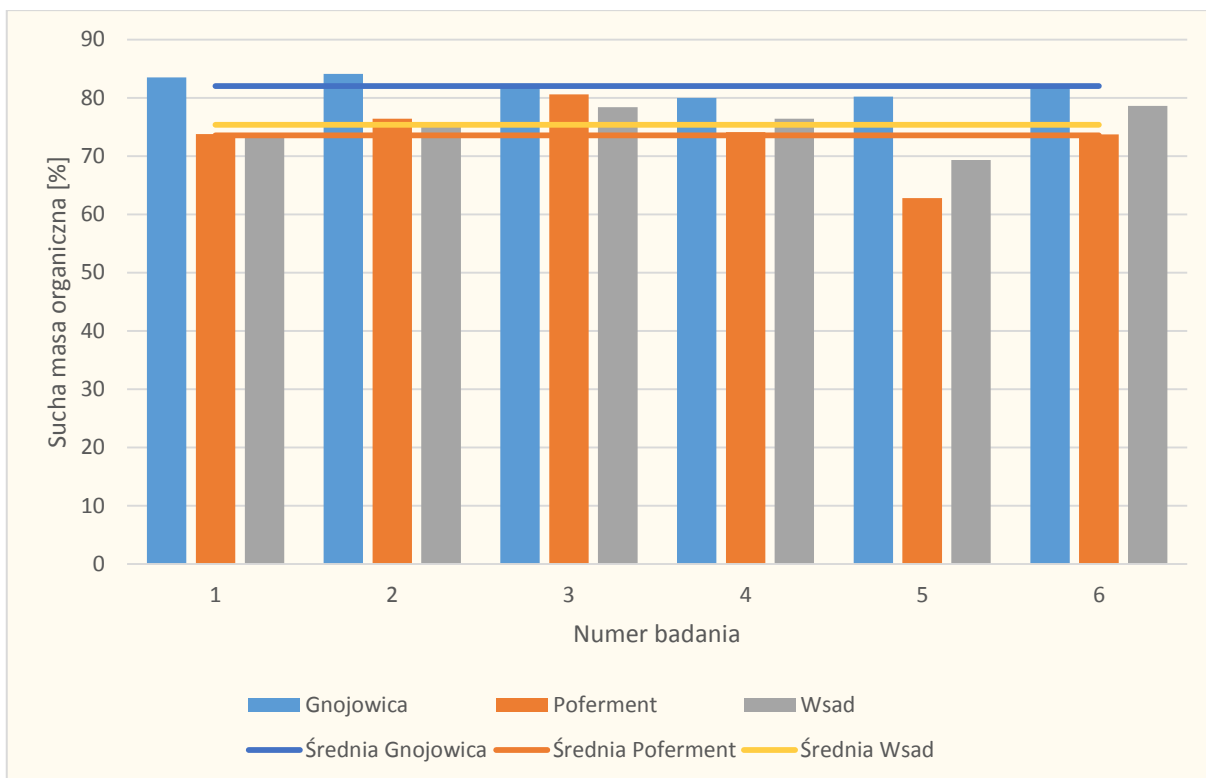
Tabela 3.7. Wyniki badań składu chemicznego gnojowicy, wykonane w 1 roku badań [badania własne].

Nr badania	-	1	2	3	4	5	6	7	8
Sucha masa	%	8,99	7,45	7,1	8,08	8,45	8,5	8,10	7,75
Sucha masa organiczna	%	83,1	81,8	80,6	80,1	81,4	82,3	83,5	84,1
Wapń Ca	g·kg ⁻¹ ś.m.	37,4	28,8	20,4	24,0	43,9	29,2	20,7	20,9
Magnez Mg	g·kg ⁻¹ ś.m.	9,23	10,8	9,92	9,42	22,2	9,22	7,56	6,01
Sód Na	g·kg ⁻¹ ś.m.	6,79	5,16	6,77	3,46	6,44	5,62	5,55	7,60
Fosfor P	g·kg ⁻¹ ś.m.	10,1	7,70	8,07	12,5	7,46	8,37	9,6	5,96
Potas K	g·kg ⁻¹ ś.m.	33,0	24,6	25,4	20,7	22,8	22,2	23,50	19,3
Żelazo Fe	g·kg ⁻¹ ś.m.	1,13	2,0	1,04	0,817	1,67	1,08	1,21	0,998
Siarka S	g·kg ⁻¹ ś.m.	6,08	4,66	5,07	6,27	5,48	4,80	5,49	4,36
Molibden Mo	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,54	1,75	1,75	1,75	2,18	2,21	2,27	1,75
Kobalt Co	mg·kg ⁻¹ ś.m.	1,45	1,47	0,665	1,80	1,50	1,38	1,31	0,624
Mangan Mn	g·kg ⁻¹ ś.m.	0,164	0,318	0,229	0,399	0,547	0,296	0,22	0,227
Cynk Zn	mg·kg ⁻¹ ś.m.	311	299	198	372	417	374	194	201
Ołów Pb	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,62	8,84	4,78	1,55	4,6	2,96	5,88	11,2
Kadm Cd	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,2410	0,527	0,273	0,268	0,620	0,229	0,242	0,300
Chrom Cr	mg·kg ⁻¹ ś.m.	2,30	3,47	1,97	1,70	2,39	1,70	1,05	2,44
Miedź Cu	mg·kg ⁻¹ ś.m.	282	54,9	42,7	110	78,9	138	52,7	32,2
Nikiel Ni	mg·kg ⁻¹ ś.m.	6,13	4,54	6,95	4,25	7,77	5,18	5,43	6,03
Azot N	% ś.m.	5,0	2,7	2,7	3,0	2,3	2,6	3,9	3,6
Węgiel C	% ś.m.	45	41	43	46	35	42	43	43
Rtęć Hg	mg·kg ⁻¹ ś.m.	0,014	0,016	0,010	0,011	0,009	0,011	0,008	0,014
Azot amonowy NNH4	mg·kg ⁻¹ ś.m.	1048	760	1027	1763	869	1343	707	193
Siarczany SO ₄ ²⁻	mg·kg ⁻¹ ś.m.	358	1479	372	1399	1034	1633	1470	416

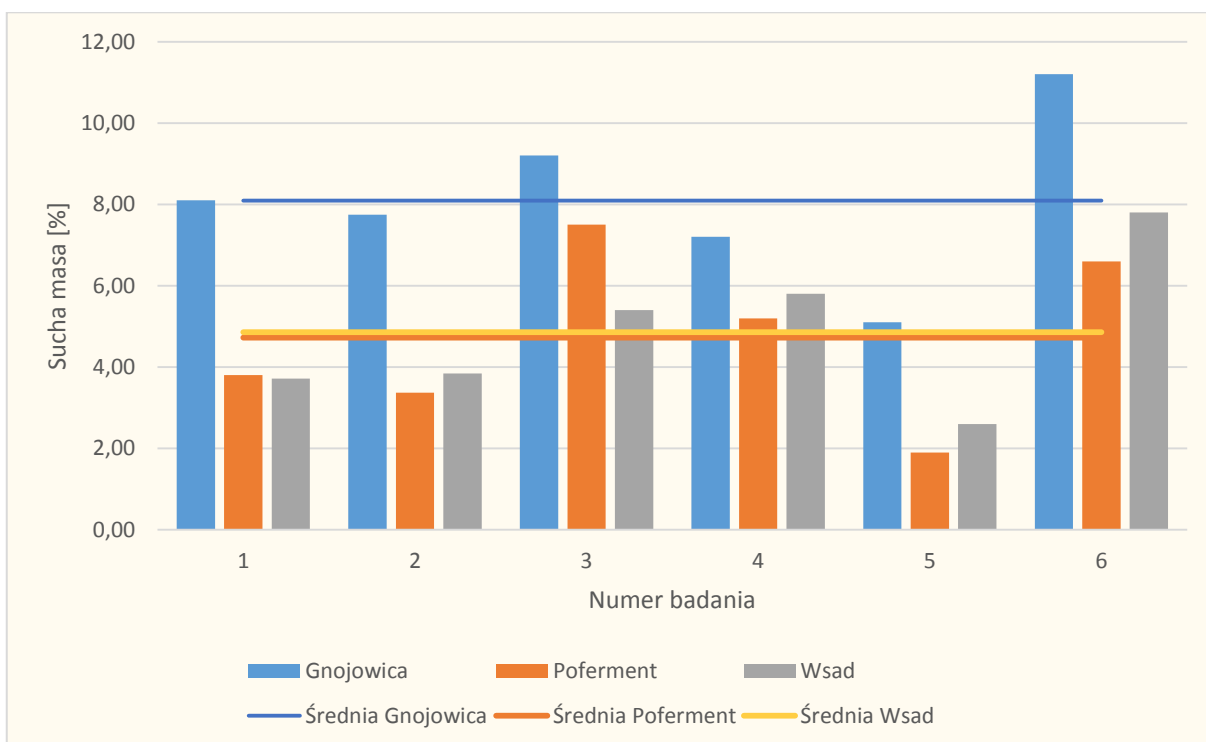
Tabela 3.8. Wyniki badań składu chemicznego gnojowicy, wykonane w 2 roku badań [badania własne].

Nr badania	-	9	10	11	12	13	14	15
Sucha masa	%	9,2	7,2	5,1	11,2	9,4	6,2	8,5
Sucha masa organiczna	%	82,4	80,0	80,2	82,0	84	83,1	82,1
Wapń Ca	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	23,1	17,8	23,1	24,5	35,0	23,3	20,9
Magnez Mg	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	6,20	6,32	6,29	7,49	10,7	8,16	10,1
Sód Na	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	5,53	5,98	8,54	8,12	12,4	4,16	4,16
Fosfor P	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	8,87	8,55	6,96	6,84	11,8	6,15	8,57
Potas K	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	17,2	30,5	29,4	20,6	53,2	42,8	36,2
Żelazo Fe	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	0,652	2,27	1,21	0,488	0,951	0,903	1,07
Siarka S	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	5,70	4,83	5,93	4,61	5,89	4,28	6,93
Molibden Mo	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	2,60	2,76	2,36	2,56	2,88	1,75	1,75
Kobalt Co	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	1,09	0,796	0,950	1,33	2,88	0,412	1,64
Mangan Mn	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	0,256	0,201	0,16	0,309	0,255	0,172	0,275
Cynk Zn	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	232	148	150	423	329	168	287
Ołów Pb	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	3,32	2,98	3,62	2,73	2,61	1,73	3,28
Kadm Cd	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	0,240	0,261	0,239	0,189	0,173	0,160	0,262
Chrom Cr	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	1,88	3,32	5,72	1,34	3,38	1,16	3,8
Miedź Cu	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	505	106	78,9	89,7	51,1	38,8	286
Nikiel Ni	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	9,05	5,36	5,04	5,13	6,59	3,95	5,50
Azot N	% ś.m.	4,6	3,8	3,7	3,6	3,1	3,7	3,3
Węgiel C	% ś.m.	43	42	43	44	42	50	41
Rtęć Hg	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	0,013	0,016	0,016	0,010	0,011	0,008	0,012
Azot amonowy NNH_4	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	468	422	349	378	773	836	809
Siarczany SO_4^{2-}	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ś.m.	2439	1021	1473	487	1058	2527	1132

W celu porównania ilości poszczególnych pierwiastków w pofermencie, biomasie oraz gnojowicy uzyskanych podczas prowadzonych badań, wykonane zostały wykresy przedstawione na rysunkach 3.1 – 3.20.

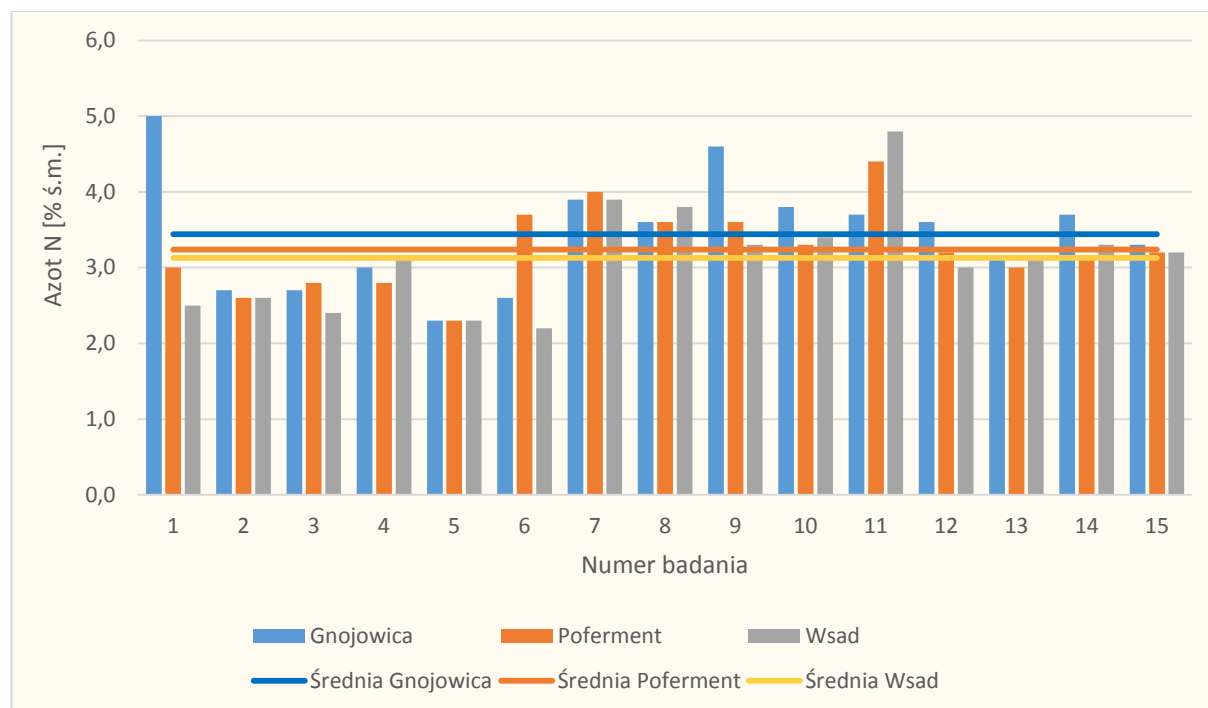


Rys. 3.1. Porównanie ilości suchej masy organicznej w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]

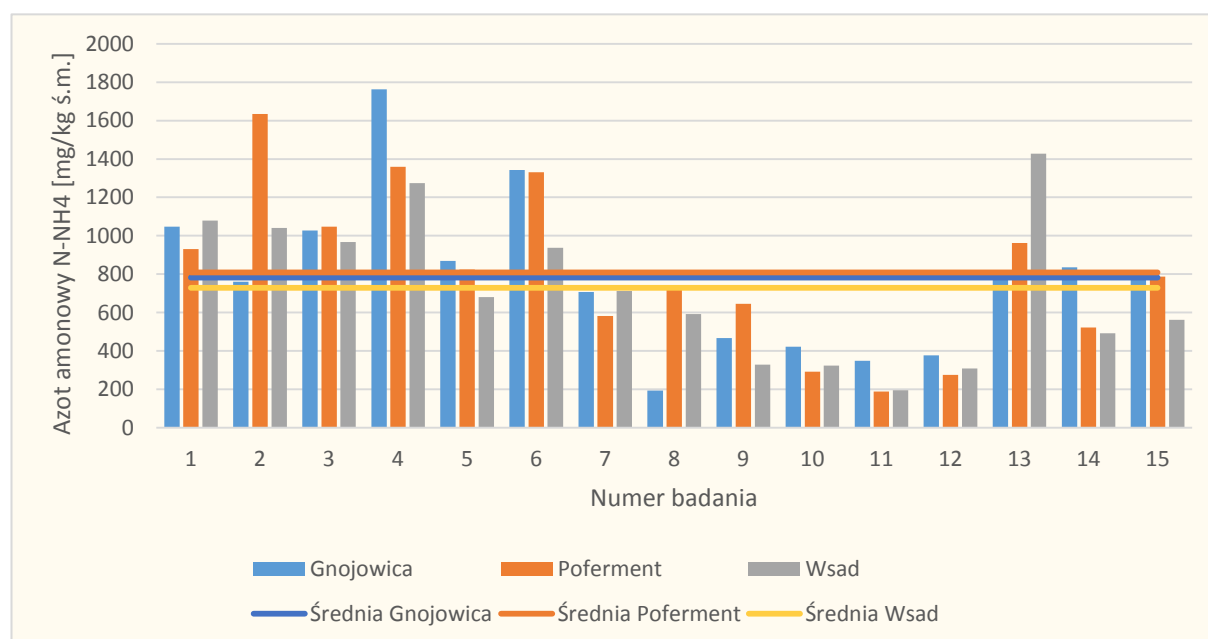


Rys. 3.2. Porównanie ilości suchej masy w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]

Analizując wyniki przedstawione na rysunkach 3.1 i 3.2 można zauważyć, że najwięcej suchej masy oraz suchej masy organicznej znajduje się w gnojowicy. Ich zawartość w biomacie oraz pofermencie jest do siebie zbliżona.

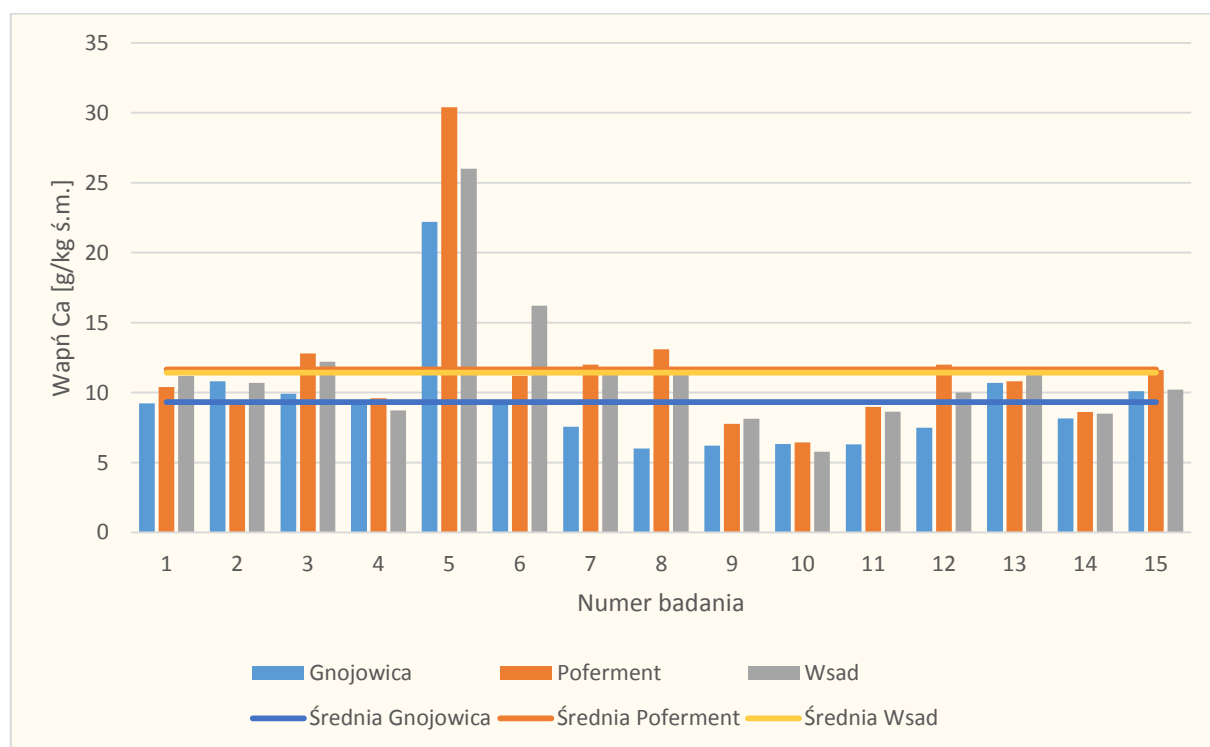


Rys. 3.3. Porównanie ilości azotu w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]

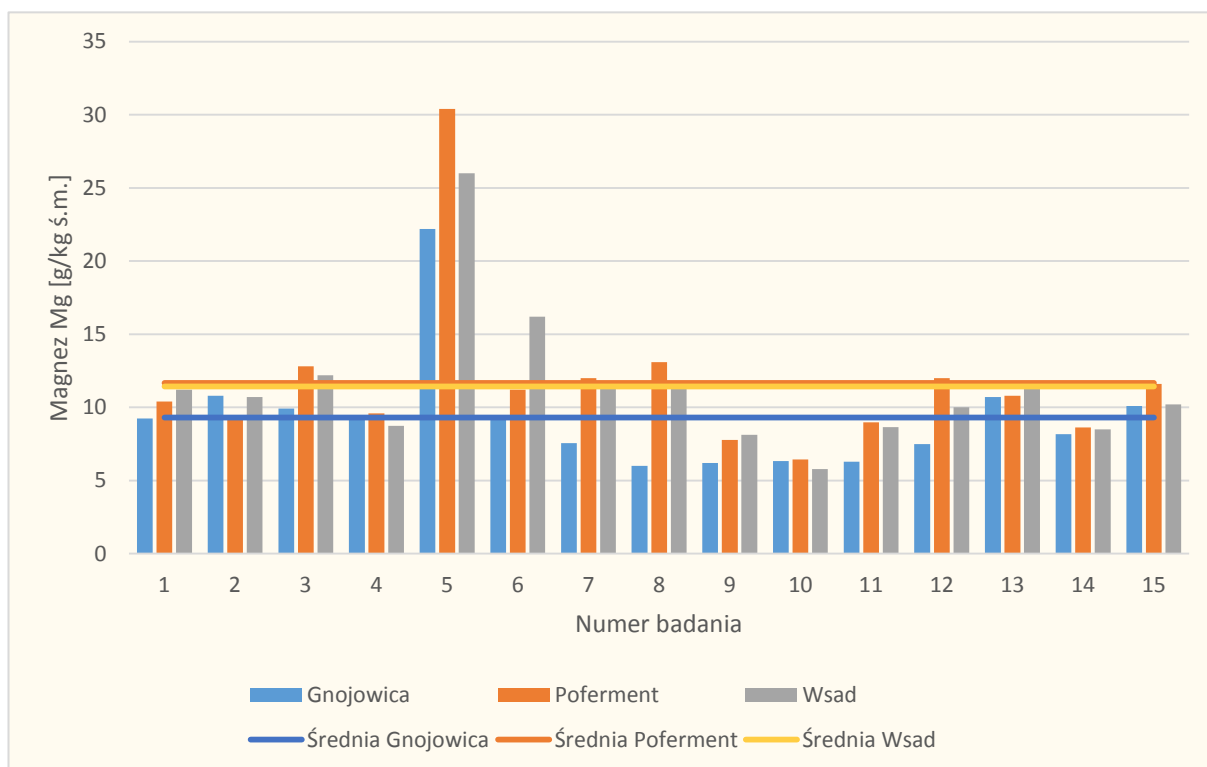


Rys. 3.4. Porównanie ilości azotu amonowego w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]

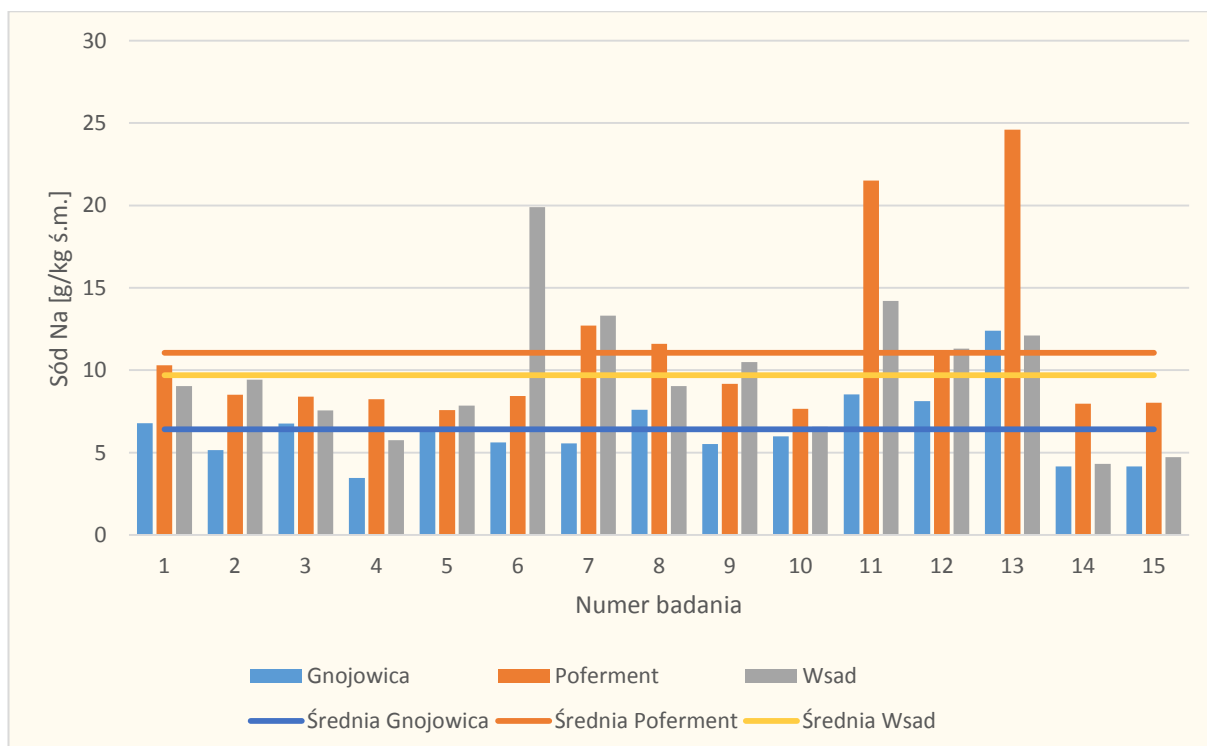
Z danych przedstawionych na rysunkach 3.3 i 3.4 wynika, że zawartość azotu w większości badanych próbek jest do siebie zbliżona. Jedyne w dwóch przypadkach zawartość azotu w gnojowicy była znacząco większa od ilości, która znajdowała się w pofermencie oraz w sadzie do biogazowni. Przy porównywaniu zawartości azotu amonowego, nie można wskazać jednoznacznej zależności miejsca pochodzenia próbki i ilości badanego pierwiastka. Występował znaczący rozrzut zmierzonych wartości oraz zmienność występowania wartości maksymalnych. Pierwiastek ten jest ważnym składnikiem m.in. aminokwasów, białek, kwasów nukleinowych oraz barwników, tj. chlorofilu, alkaloidów oraz występujących jedynie u goździkowatych barwników betalainowych, jak betanina, amarantyna i betaksantyna. Niedoboru azotu prowadzą do zahamowania wzrostu oraz kwitnienia roślin.



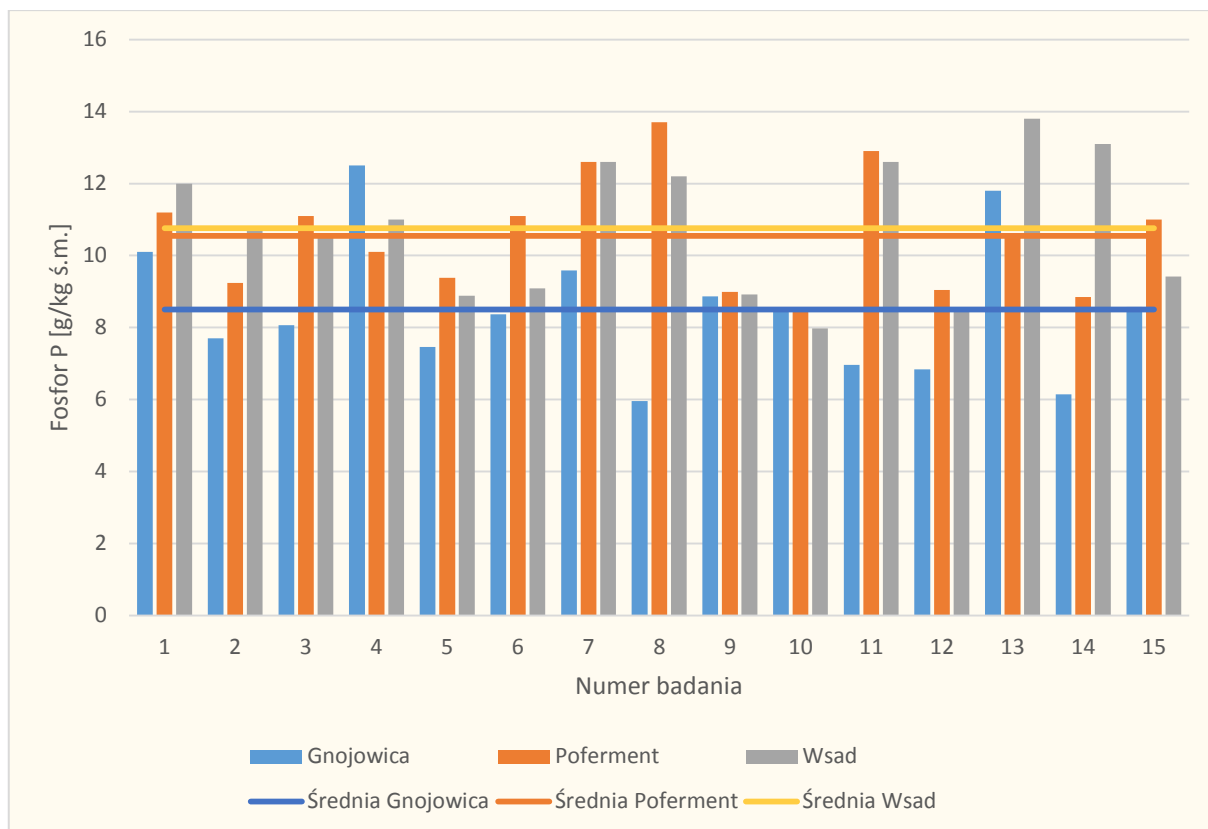
Rys. 3.5. Porównanie ilości wapnia w pofermencie, w sadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]



Rys. 3.6. Porównanie ilości magnezu w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]



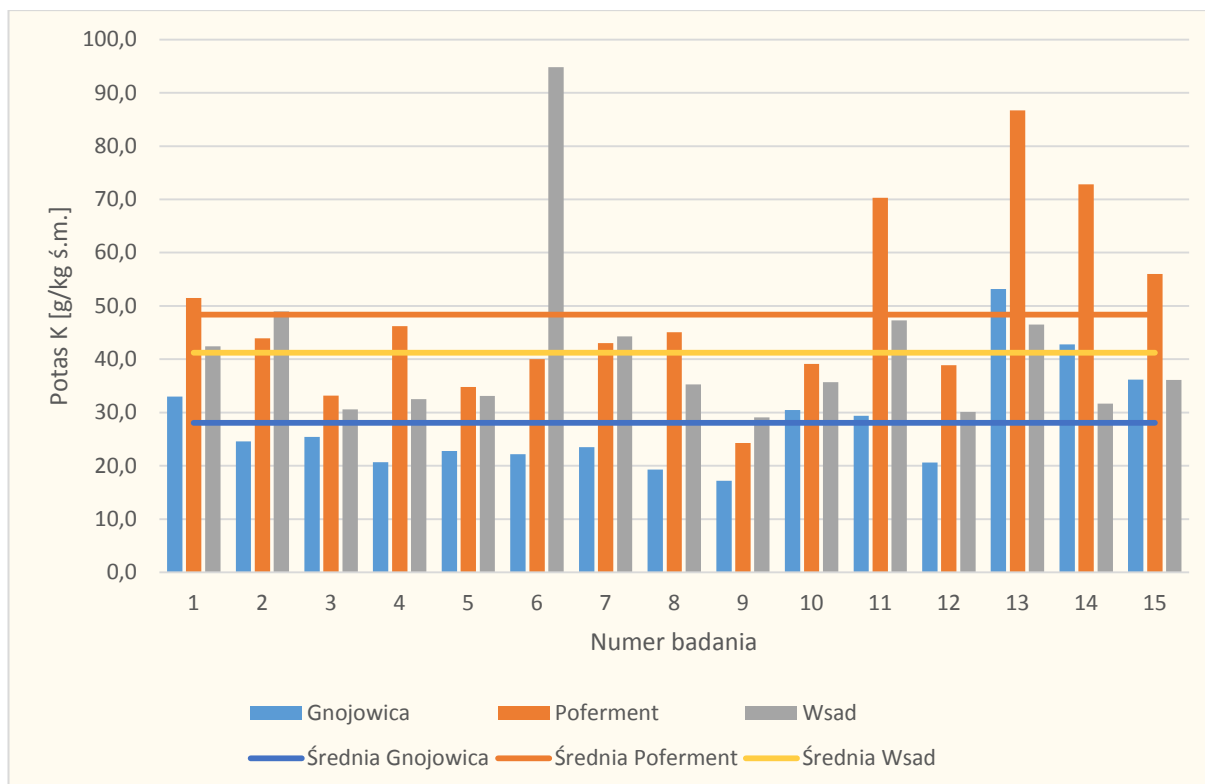
Rys. 3.7. Porównanie ilości sodu w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]



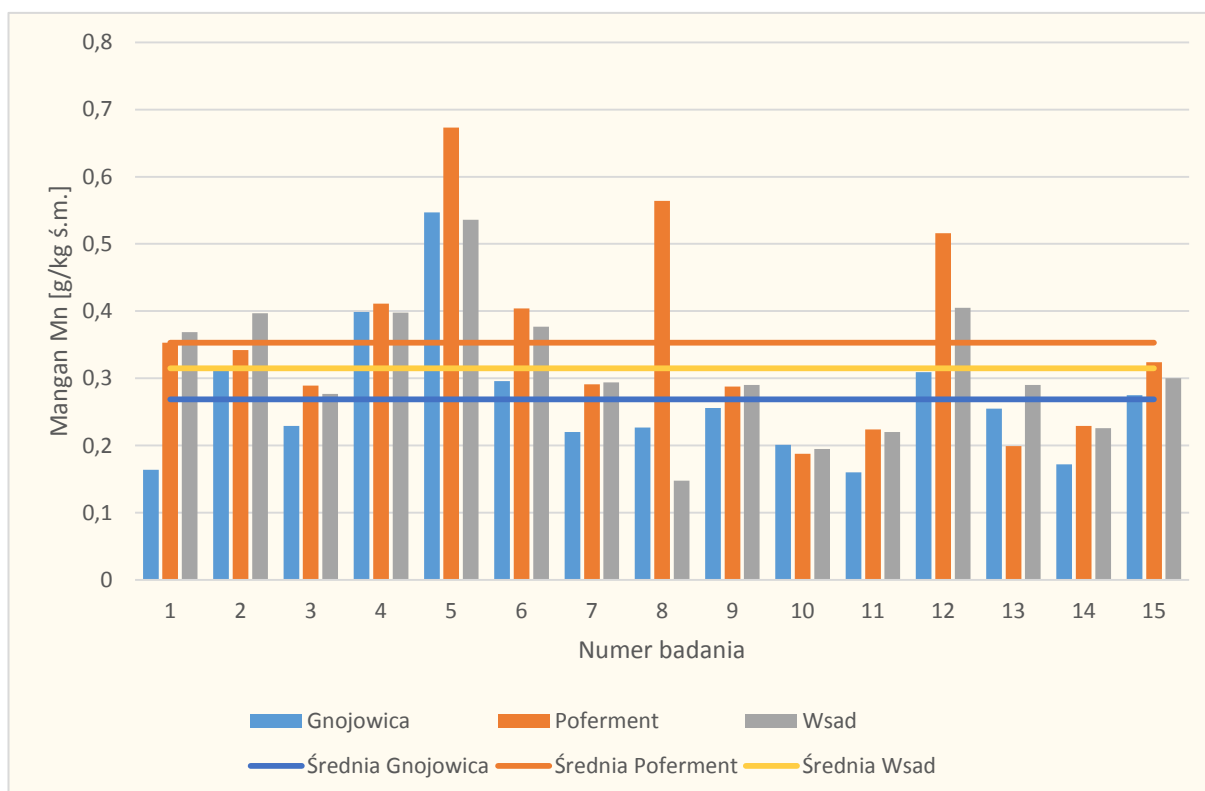
Rys. 3.8. Porównanie ilości fosforu w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]

Zawartość wapnia oraz magnezu w badanych próbkach była na porównywalnym poziomie (rys. 3.5 i 3.6), jednakże można zauważyć, że najmniejsze wartości odnotowywano w większości przypadków w gnojowicy. Niedobór wapnia powoduje nie tylko zakłócenia gospodarki wodnej, ale również wywołuje zaburzenia w budowie i funkcjonowaniu błon plazmatycznych, prowadzi do chlorozy liści (zaburzenia w wytwarzaniu chlorofilu, w wyniku którego liście żółkną) oraz zahamowania wzrostu roślin wraz z deformacją liści. Zbyt mała zawartość magnezu wywołuje w roślinach nekrozę (obumieranie tkanek) brzegów liści oraz hamuje proces fotosyntezy.

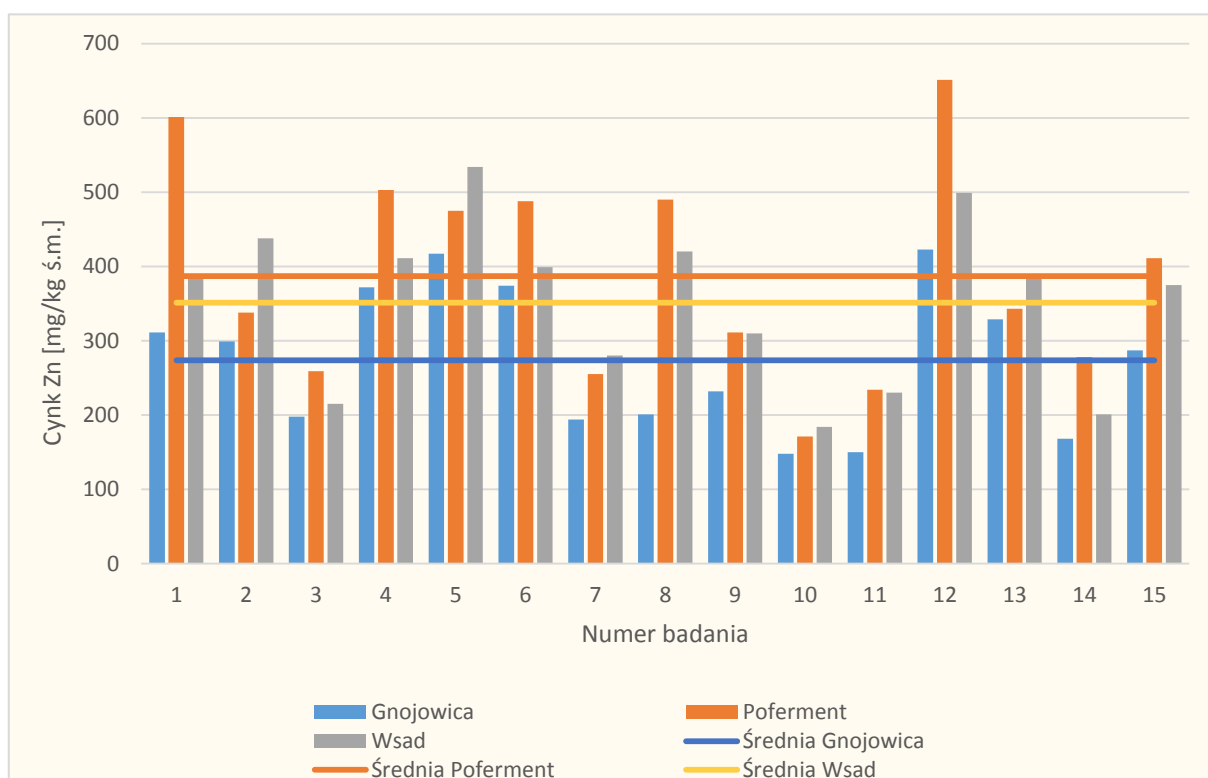
Znacznie wyraźniejsze różnice zauważalne są w przypadku sodu i fosforu (rys. 3.7 i 3.8). Najwięcej sodu (w odniesieniu do kg świeżej masy) jest w pofermencie, a najmniejsze ilości występują w gnojowicy. Ilość fosforu w biomacie oraz pofermencie jest porównywalna i widocznie większa od ilości tego pierwiastka występującej w gnojowicy. Niedobór fosforu widoczny jest w postaci pociemnienia liści i prowadzi do zahamowania wzrostu roślin i fotosyntezy.



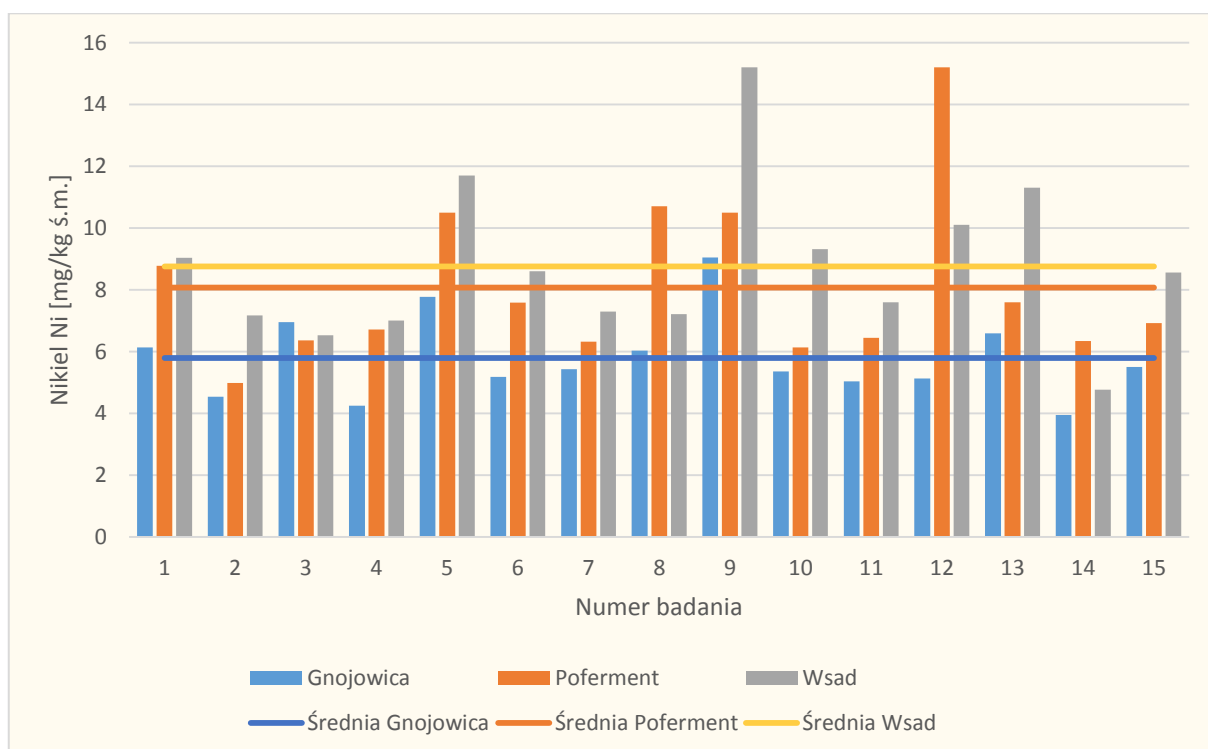
Rys. 3.9. Porównanie ilości potasu w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]



Rys. 3.10. Porównanie ilości manganu w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]

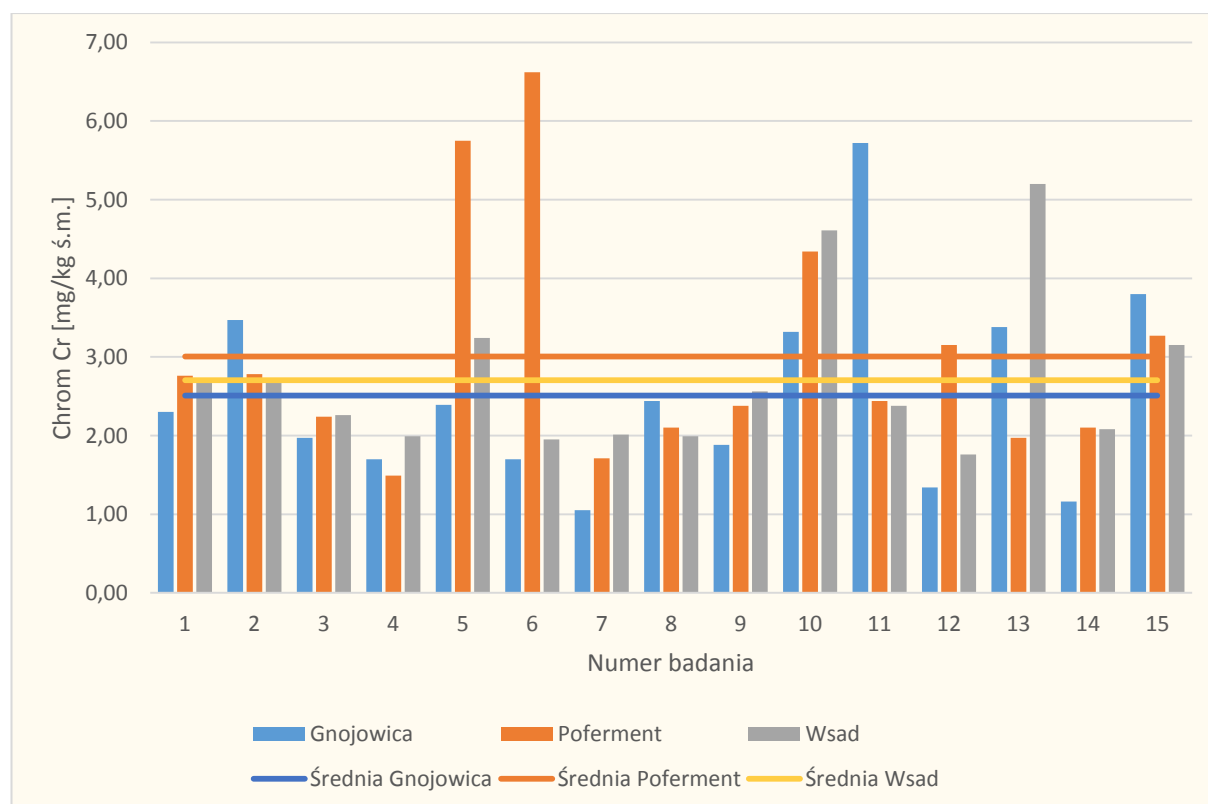


Rys. 3.11. Porównanie ilości cynku w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]

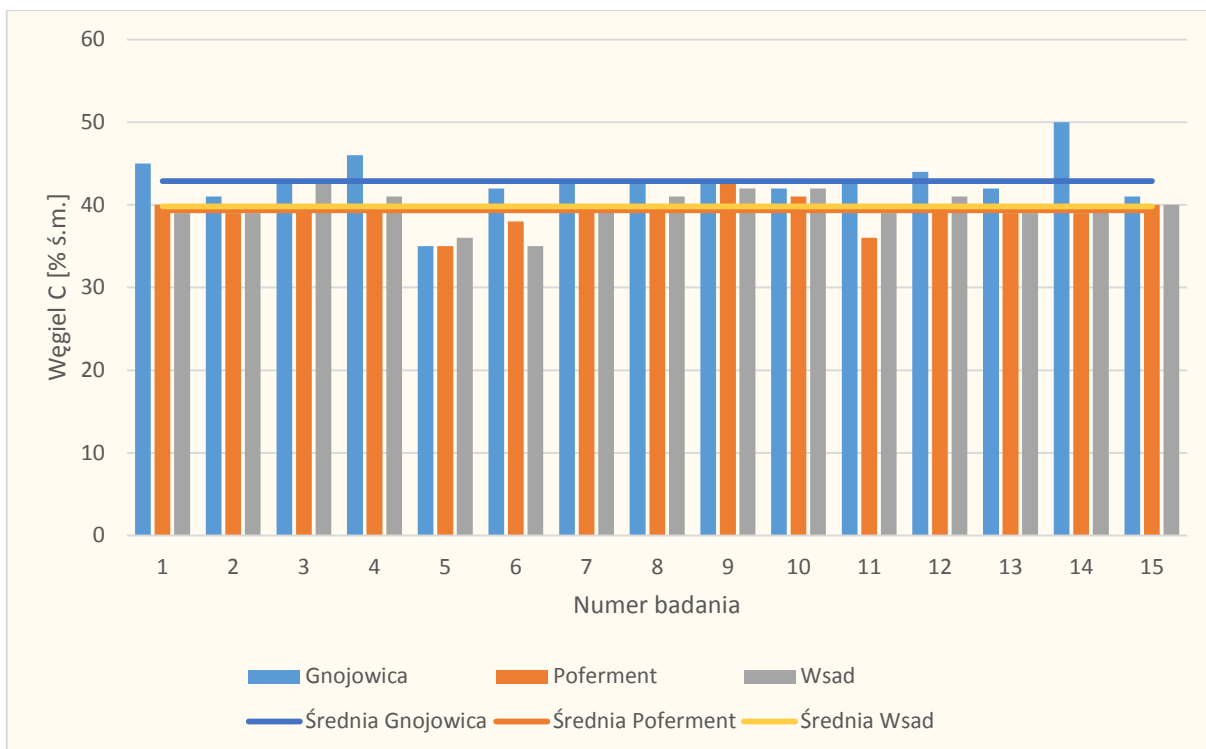


Rys. 3.12. Porównanie ilości niklu w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]

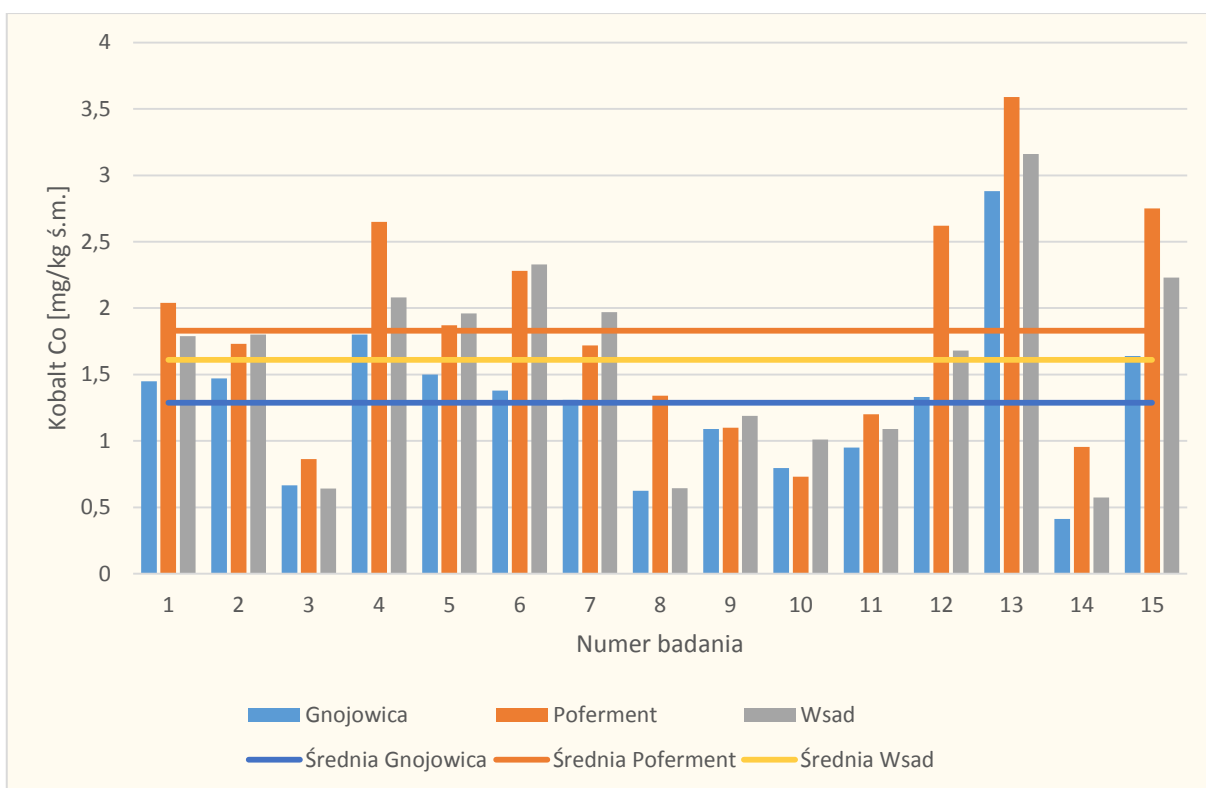
Z wartości przedstawionych na rysunkach 3.9 – 3.12 wynika, że najmniejsza ilość potasu, manganu, cynku oraz niklu występuje w gnojowicy. Najwięcej tych pierwiastków (znacząca większość badanych próbek) występuje w pofermencie. Braki potasu prowadzą do utraty turgoru komórek oraz nekrozy brzegów liści, co w konsekwencji powoduje zahamowanie wzrostu roślin. Podobnie spadek wzrostu roślin zauważalny jest przy niedostatecznej ilości cynku. Przy niedostatku tego pierwiastka w roślinach następuje chloroza oraz karlenie liści. Do chlorozy liści prowadzi również niedobór manganu, który dodatkowo prowadzi do nekrozy (usychania) liści.



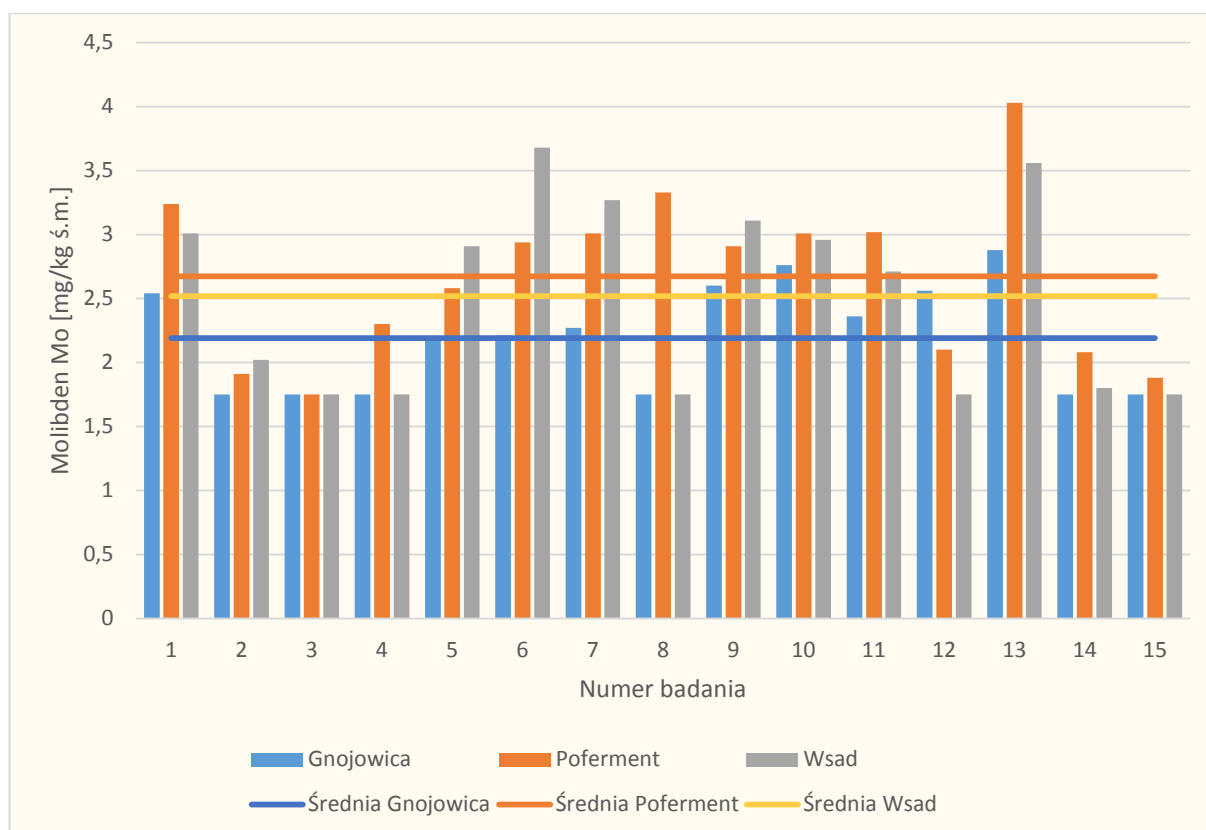
Rys. 3.13. Porównanie ilości chromu w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]



Rys. 3.14. Porównanie ilości węgla w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]

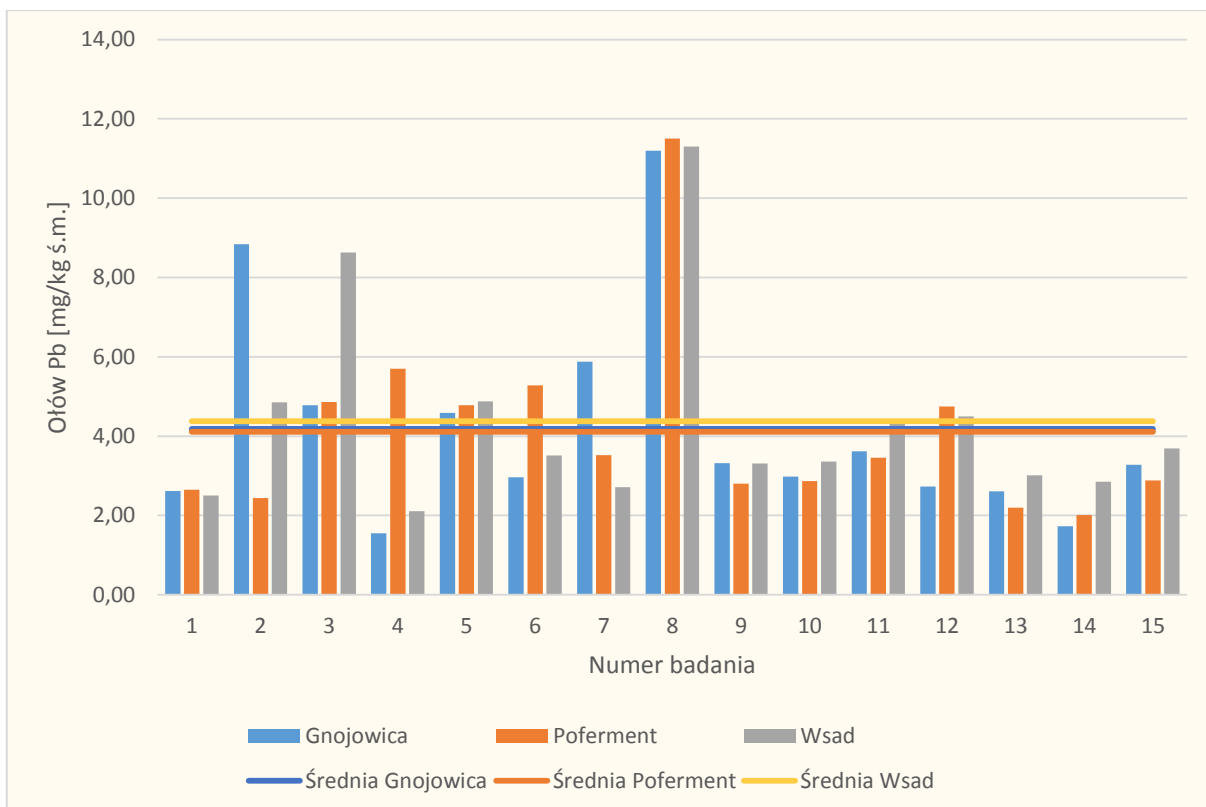


Rys. 3.15. Porównanie ilości kobaltu w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]

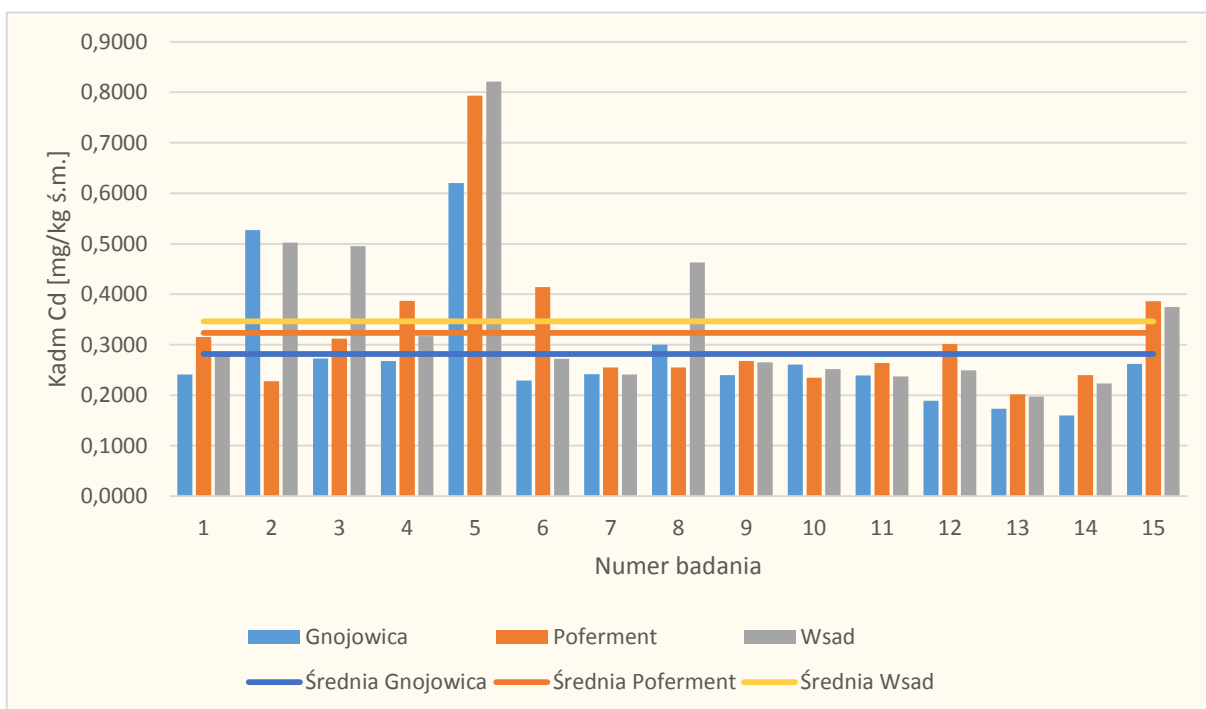


Rys. 3.16. Porównanie ilości molibdenu w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]

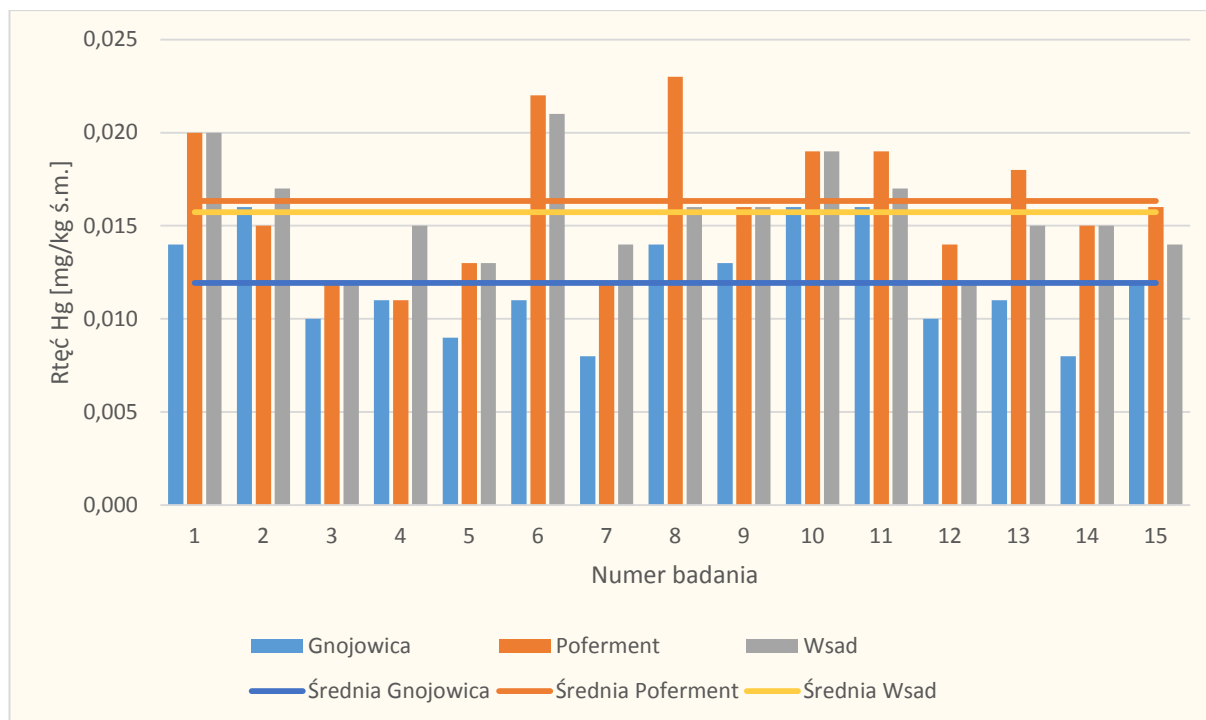
Najwięcej węgla (rys. 3.14) zanotowano w gnojowicy (w pofermencie i wsadzie ilości są porównywalne). Zmierzone ilości chromu (rys. 3.13) zmieniały się dość znacząco w zależności od numeru próbki i bardzo trudno jest wskazać, gdzie tego pierwiastka znajdowało się najwięcej. W przypadku kobaltu oraz molibdenu (rys. 3.15 i 3.16), największe ilości zarejestrowano w pofermencie, a najmniejsze w gnojowicy. Tu również wystąpił znaczący rozrzut zmierzonych wartości (w zależności od próbki często różniły się one nawet ponad dwukrotnie). Niedobory molibdenu skutkują zaburzeniami metabolizmu azotu w roślinie, wywołują chlorozę liści oraz zahamowanie wzrostu (najczęściej przez deformację pędów).



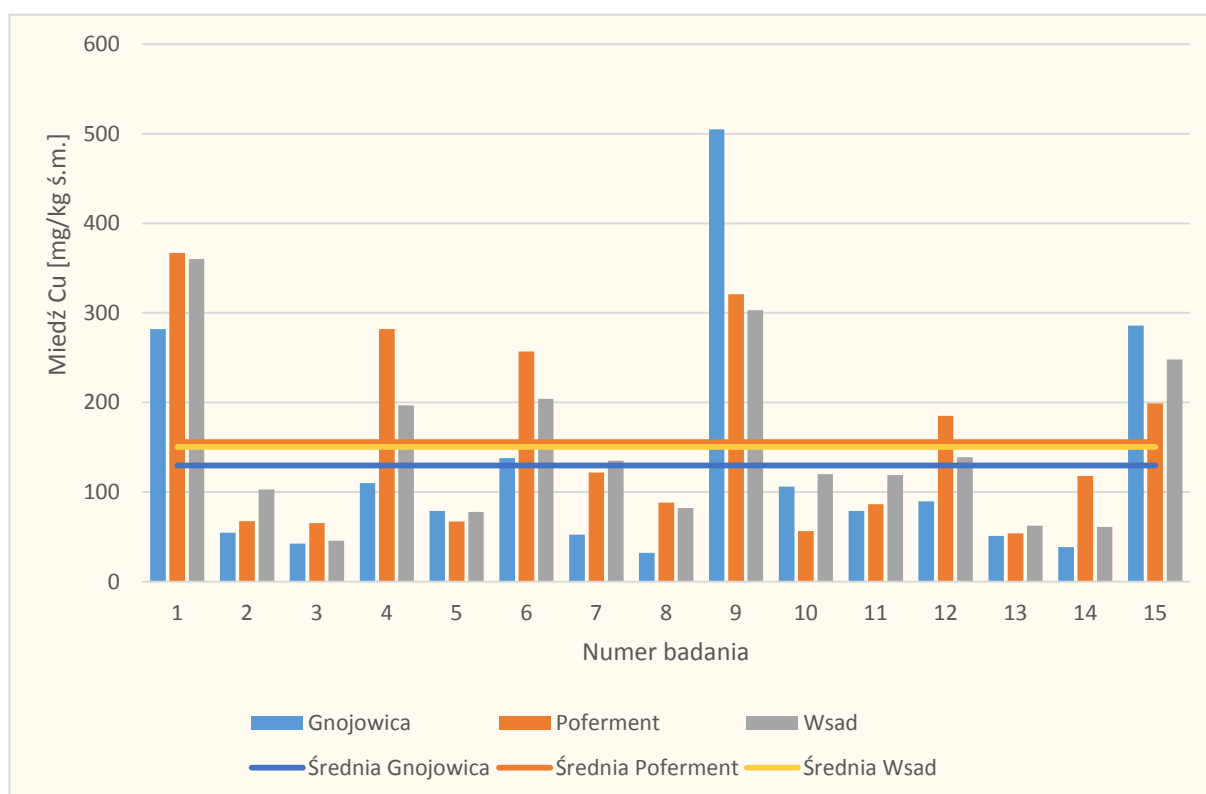
Rys. 3.17. Porównanie ilości ołowiu w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]



Rys. 3.18. Porównanie ilości kadmu w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]



Rys. 3.19. Porównanie ilości rtęci w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]



Rys. 3.20. Porównanie ilości miedzi w pofermencie, wsadzie (składającym się z kiszonki z kukurydzy oraz obornika) i gnojowicy [badania własne]

Jeszcze większe różnice w zmierzonych wartościach zanotowano w przypadku ołowiu (rys. 3.17). Zdarzały się próbki, w których zawartość tego pierwiastka była bliska $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ świeżej masy, ale również wystąpiły próbki o zawartości blisko $12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ świeżej masy. W przypadku ołowiu, proces fermentacyjny, nie wpływa na zawartość tego pierwiastka w pofermencie. Podobne wnioski można wyciągnąć w przypadku miedzi (rys. 3.20), gdzie jej zawartość w poszczególnych próbkach różniła się nawet sześciokrotnie. Niedobory miedzi powodują zakłócenia procesu fotosyntezy, a zauważalne są na plantacjach poprzez niebieskie zabarwienie i usychanie (nekroza) liści. Ciekawą zależność można zaobserwować w przypadku rtęci (rys. 3.19). Najmniej jest jej w gnojowicy, a wartości w biomase podawanej do biogazowni i pofermencie są podobne. Oznacza to, że pierwiastek ten dostaje się do komory fermentacyjnej wraz z kiszonką z kukurydzy.

4. Wyniki badań terenowych i ich omówienie

4.1. Warunki pogodowe

Prowadzenie działalności rolniczej to nieustanne podejmowanie decyzji, których następstwa zależne są nie tylko od wykonanych zabiegów agrotechnicznych, ale także od uwarunkowań oraz czynników klimatycznych i przyrodniczych, na obszarze których funkcjonuje gospodarstwo rolne. Wzrost i rozwój roślin uprawnych oraz ich plon zależą w znacznym stopniu od warunków środowiska. Wszelkie zaburzenia powodują zachwianie równowagi w czynnościach życiowych roślin i stają się przyczyną powstawania chorób. Lata prowadzonych badań były zróżnicowane pod względem układu warunków pogodowych w okresie wegetacji kukurydzy (tab. 4.1). Według danych uzyskanych z Centralnego Ośrodka Badań Odmian Roślin Uprawnych (stacja doświadczalna oceny odmian w Krzyżewie) dla województwa podlaskiego, wiosna w 2021 roku była stosunkowo chłodna, w II dekadzie kwietnia obserwowano ochłodzenie i opady śniegu, które hamowały rozwój roślin głównie ciepłolubnych, a w tym kukurydzy, opóźniając wegetację zbóż o około 7-10 dni. W 2022 r. I i II dekada maja była chłodna, z małą ilością opadów. Duża ilość opadów w III dekadzie oraz ochłodzenie opóźniło wegetację roślin. W I i II dekadzie czerwca opady były umiarkowane, natomiast od połowy miesiąca wystąpiły upały. Brak opadów w III dekadzie powodował podsychanie traw. I dekada lipca stosunkowo chłodna, z dużą ilością opadów. Nawalne opady wraz z porywistym wiatrem w II dekadzie lipca spowodował silnym wyleganiem m.in. kukurydzy. W 2021 roku łączna suma opadów w okresie od siewu do zbioru roślin (V–IX) kształtowała się na poziomie 430,9 mm, a średnia dobowa temperatura tego okresu wyniosła 16,6 °C. Suma opadów i średnia dobowa temperatura w 2022 roku wyniosła odpowiednio 333,8 mm i 16,2 °C. Kukurydza ma bardzo duże wymagania cieplne, które wynikają z pochodzenia tego gatunku. Intensywny wzrost i budowa dużej biomasy nadziemnej powodują, że mimo względnie małego współczynnika transpiracji, kukurydza ma również wysokie zapotrzebowanie na wodę (Rutkowski, 2018). Na podstawie przeprowadzonych badań terenowych zauważono, że uzyskane wyniki w pierwszym i drugim roku badawczym różnią się od siebie. W sezonie wegetacyjnym 2021 roku sprzyjające warunki wilgotnościowo-termiczne wpłynęły korzystnie na cały okres wegetacji kukurydzy. Znalazło to odzwierciedlenie w wydajniejszym plonowaniu roślin, bogatszą zawartością suchej masy, większą wysokością roślin i osadzenia kolby dla każdego z zastosowanego nawozu oraz w większości przypadków lepszą średnią oceną kondycji kukurydzy oraz

mniejszym porażeniem chorobami w porównaniu do wyników uzyskanych w drugim roku badań.

Tabela 4.1. Charakterystyka warunków pogodowych w okresie wegetacji w latach 2021–2022 dla województwa podlaskiego [opracowanie własne]

Wyszczególnienie	Rok	Miesiące					
		V	VI	VII	VIII	IX	V-IX
Średnia dobową temperatura [°C]	2021	12,2	19,4	21,8	17,0	12,4	16,6
	2022	12,2	18,3	18,4	21,0	10,9	16,2
Średnia dobową temperatura z wielolecia [°C]	1991-2020	13,1	16,4	18,4	17,5	12,6	15,6
Suma opadów [mm]	2021	77,9	61,2	122,8	114,2	54,8	430,9
	2022	64,9	46,4	115,3	13,4	93,8	333,8
Suma opadów z wielolecia [mm]	1991-2020	69,1	65,4	86,5	69,4	56,0	346,4

Źródło: na podstawie pomiarów ze stacji meteorologicznej SDOO w Krzyżewie

Dokładna znajomość chemicznych i fizycznych właściwości gleb, cech otaczającego klimatu oraz stosunków wodnych bezpośrednio przyczynia się do prawidłowości w rozwoju produkcji roślinnej. Wynika to z faktu, iż pierwszym krokiem w prowadzeniu gospodarstwa rolnego stanowi dobór uprawianych gatunków roślin, uwzględniając przy tym aspekty natury. Następny krok to czynności związane z agrotechniką, aż po zbiory plonów, które informują o prawidłowym przebiegu całego procesu. Według ekspertów zajmujących się uprawą kukurydzy, rolnik ma decydujący wpływ na kształtowanie poziomu plonowania tej rośliny. Wśród czynników wpływających na maksymalny plon kukurydzy wymienia się: dobór odmiany (w 30%), zabiegi uprawowe (w 40%) oraz warunki klimatyczne (w 30%). Plantator ma pełen wpływ na pierwsze z dwóch wymienionych czynników (Bereś i in., 2016).

4.2. Wyniki badań i ich analiza

Na podstawie przeprowadzonych badań terenowych przez okres dwóch lat otrzymano informację na temat ilości zebranego ziarna kukurydzy, zawartości suchej masy, wysokości roślin oraz wysokości osadzenia kolby w zależności od zastosowanego nawozu (tab. 4.2, 4.3).

Ilość zebranego ziarna kukurydzy z pól doświadczalnych w pierwszym roku badawczym mieściła się w zakresie od 130,6 do 249,25 kg, natomiast w drugim od 143,81 do 228,07 kg. Przeliczając te wartości w odniesieniu do hektara otrzymano odpowiednio od 7,25 do 13,85 Mg z hektara w pierwszym roku badań oraz od 7,99 do 12,67 Mg z hektara w

drugim roku badań. Na podstawie wyznaczonych średnich zaobserwowano, że uzyskane wartości były zbliżone w dwóch latach badawczych dla poszczególnych nawozów, jednakże w każdym przypadku w drugim roku badań były niższe w porównaniu do pierwszego. Najwięcej plonów uzyskano z pola nawożonego pofermentem, natomiast najmniej z pola nawożonego pofermentem + NPK + mikroelementami (rys. 4.1).

Tabela 4.2. Ilość zebranego ziarna, zawartość suchej masy, wysokość rośliny, wysokość osadzenia kolby w 1 roku badań [opracowanie własne]

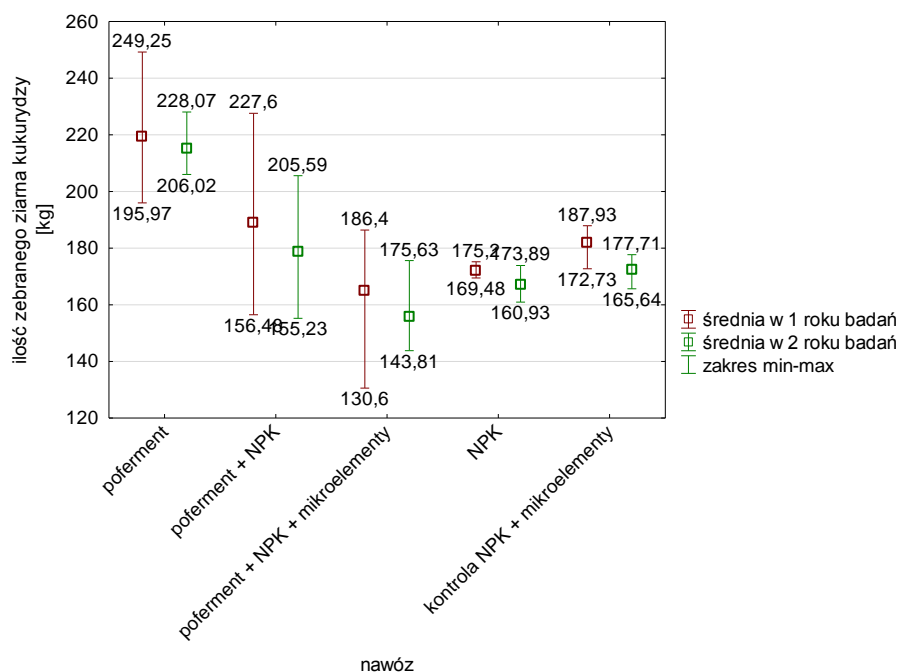
Nawóz	Nr poletka	Ilość zebranego ziarna kukurydzy [kg]	Zawartość suchej masy [%]	Wysokość rośliny [cm]	Wysokość osadzenia kolby [cm]
Poferment	1	212,78	28,50	317,00	115,00
	2	249,25	28,80	319,00	112,00
	3	195,97	28,50	320,00	110,00
Poferment + NPK	1	182,73	27,40	325,00	120,00
	2	227,60	27,60	335,00	122,00
	3	156,48	27,50	330,00	125,00
Poferment + NPK + mikroelementy	1	186,40	26,3	330,00	130,00
	2	177,35	26,3	320,00	125,00
	3	130,60	26,2	315,00	128,00
NPK	1	169,48	29,70	275,00	115,00
	2	171,33	29,50	280,00	110,00
	3	175,20	29,80	288,00	105,00
Kontrola NPK + mikroelementy	1	172,73	27,10	290,00	110,00
	2	184,55	27,20	295,00	120,00
	3	187,93	27,30	298,00	118,00

Tabela 4.3. Ilość zebranego ziarna, zawartość suchej masy, wysokość rośliny, wysokość osadzenia kolby w 2 roku badań [opracowanie własne]

Nawóz	Nr poletka	Ilość zebranego ziarna kukurydzy [kg]	Zawartość suchej masy [%]	Wysokość rośliny [cm]	Wysokość osadzenia kolby [cm]
Poferment	1	211,11	28,10	312,30	112,40
	2	228,07	28,10	311,30	110,00
	3	206,02	28,60	313,00	110,00
Poferment + NPK	1	205,59	27,40	319,20	118,00
	2	175,42	27,20	326,20	120,00
	3	155,23	26,90	327,20	121,30
Poferment + NPK + mikroelementy	1	175,63	26,2	324,70	122,10
	2	147,37	26,3	317,70	115,50
	3	143,81	26,2	314,10	118,90

NPK	1	160,93	29,40	270,00	104,20
	2	166,71	29,40	273,70	107,40
	3	173,89	29,60	282,90	107,90
Kontrola NPK + mikroelementy	1	165,64	26,90	288,40	108,70
	2	173,87	27,20	290,60	117,10
	3	177,71	27,10	291,50	116,10

Nawożenie stanowi jeden z najważniejszych czynników plonotwórczych. Odpowiednie dawki, a także zbilansowanie składników pokarmowych decyduje o wielkości uzyskanych plonów (Chambers i in., 2000). Jak podaje Gołębiowska i Wróbel (2009) największy wpływ na plonowanie kukurydzy ma prawidłowe nawożenie azotem, ponieważ ma ona duże wymagania pokarmowe. Jednakże nawożenie powinno być zoptymalizowane ze względu na możliwość obniżania plonu po przekroczeniu pewnych poziomów dozowania składników. Dlatego stwierdzono, że zawartość azotu oraz innych składników pokarmowych w pofermencie była optymalna, co skutkowało najlepszymi plonami w porównaniu do ilości plonów po nawożeniu pozostałymi nawozami.

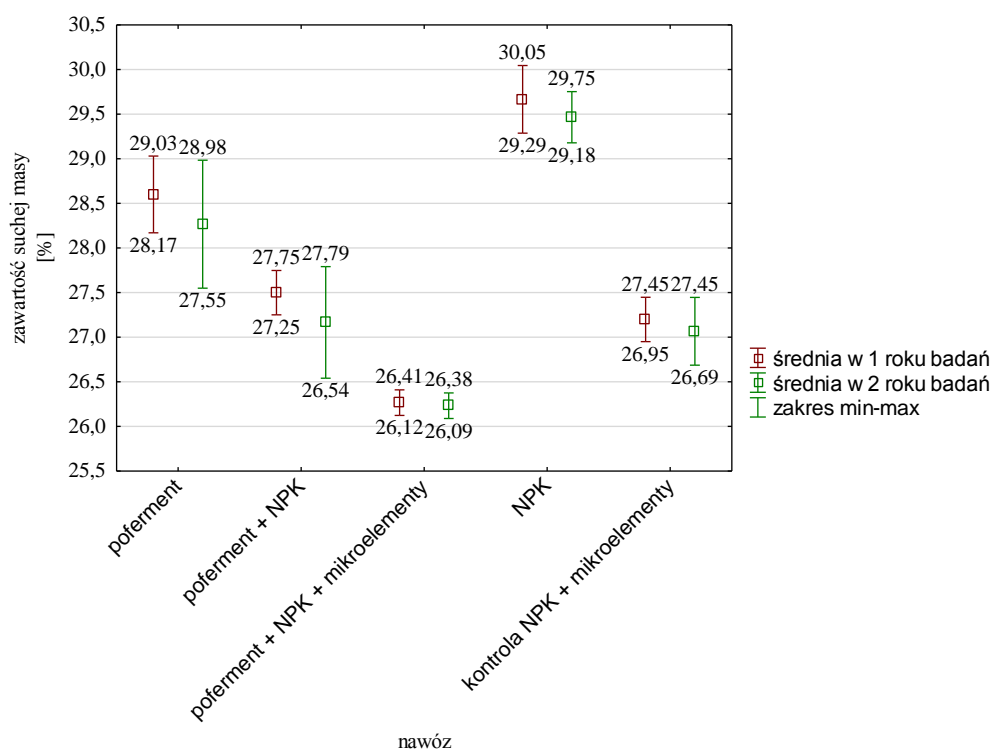


Rysunek 4.1. Ilość zebranego ziarna kukurydzy w 1 i 2 roku badawczym w zależności od zastosowanego nawozu [opracowanie własne]

Znaczne obniżenie plonów zebranych z pola po zastosowaniu pofermentu + NPK + mikroelementów mogło wynikać przede wszystkim z wyraźnie przekroczonych wymagań pokarmowych kukurydzy. Również według Beresia i in. (2020) zbyt duża dawka azotu skutkuje zwiększoną masą wegetatywną o zbyt dużej masie liści i słabych łodygach, co

przekłada się także na zwiększoną podatność na wyleganie. Kukurydza przenawożona wspomnianym składnikiem później wchodzi w fazę kwitnienia, a zarazem wolniej dojrzewa, co znajduje odzwierciedlenie w postaci spadku plonu ziarna.

Zawartość suchej masy w zebranej kukurydzy w pierwszym roku badawczym mieściła się w zakresie od 26,12 do 30,05 %, natomiast w drugim od 26,09 do 29,75 %. Najwyższe wyniki uzyskano po zbiorze kukurydzy nawożonej NPK, natomiast najniższe w przypadku kukurydzy nawożonej pofermentem + NPK + mikroelementami (rys. 4.2). Warto dodać, że rośliny nawożone jedynie pofermentem zajmują drugie miejsce w omawianej klasyfikacji.

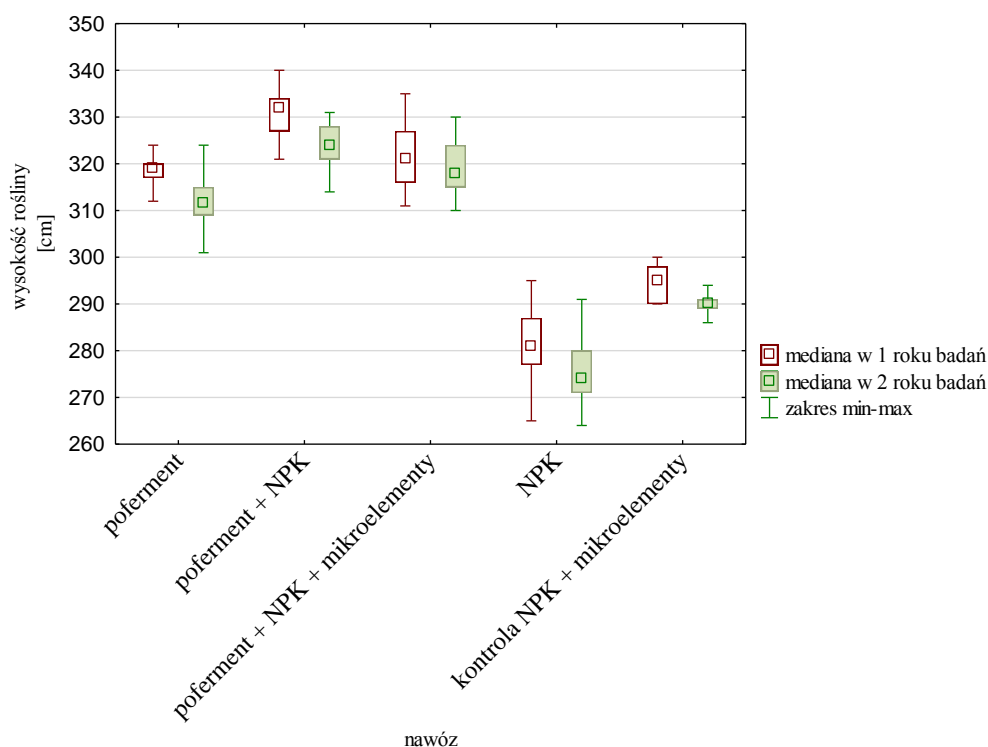


Rysunek 4.2. Zawartość suchej masy w 1 i 2 roku badawczym w zależności od zastosowanego nawożenia [opracowanie własne]

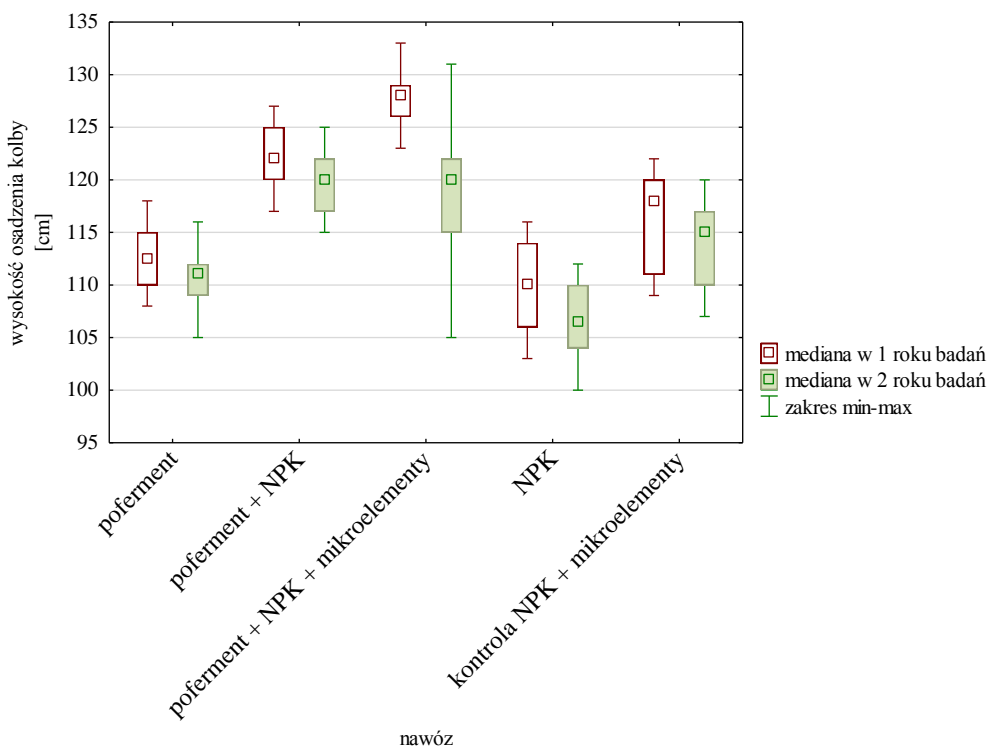
Z wyników przeprowadzonego doświadczenia widać, że znaczna intensyfikacja nawożenia przyczyniła się do ograniczenia gromadzenia suchej masy w kukurydzy. Stosowanie coraz większych nawozów mineralnych przekłada się na większą podatność gromadzenia się wody w tkankach roślin pochodzących z tych upraw, a także wzrost plonów, co w ostateczności wpływa ujemnie na zawartość suchej masy (Brandt i Molgaard, 2001; Kazimierczak i in., 2011). Jak podaje Książak i in. (2012) zwiększenie poziomu nawożenia kukurydzy azotem w badaniach prowadzonych w latach 2008 i 2009 wpłynęło na zmniejszenie zawartości suchej masy. Trend obniżania zawartości suchej masy pod wpływem

zwiększenia nawożenia azotem zauważyli również w swoich badaniach Zieleniewicz i in. (2018).

Analizując wysokość roślin, a także wysokość osadzenia kolby, zauważono, że nawożenie NPK przyczyniło się do najniższych wyników w okresie dwóch lat badawczych (rys. 4.3, rys. 4.4). Dawka pofermentu + NPK oraz pofermentu + NPK + mikroelementów przyczyniła się do uzyskania wyższych roślin oraz wyższych wartości wysokości osadzenia kolby w porównaniu do pozostałych. Kukurydza to roślina, którą trudno przenażyc azotem, jednakże zbyt wysokie dawki tego składnika mogą przyczynić się do obniżenia plonu. W takim przypadku roślina tworzy zbyt dużo zielonej masy, zawiązuje zbyt dużo kolb, których później nie może wykarmić. Ponadto przenażenie azotem wydłuża wegetację, uwrażliwia rośliny na choroby grzybowe a ziarno podczas zbioru ma wyższą wilgotność. Omówione zjawisko zauważono zestawiając wyniki zawartości suchej masy z wysokością roślin, a mianowicie stwierdzono, że im wyższa wysokość roślin, tym niższa zawartość suchej masy, za czym idzie zwiększona wilgotność. Przekłada się to również na otrzymywanie plonów z mniejszą zawartością składników bioaktywnych.



Rysunek 4.3. Wysokość rośliny w 1 i 2 roku badawczym w zależności od zastosowanego nawozu [opracowanie własne]



Rysunek 4.4. Wysokość osadzenia kolby w 1 i 2 roku badawczym w zależności od zastosowanego nawozu [opracowanie własne]

W celu stwierdzenia czy dany nawóz ma wpływ na ilości zebranego ziarna kukurydzy, zawartości suchej masy, wysokości roślin oraz wysokości osadzenia kolby zastosowano analizę wariancji ANOVA. W 1 roku badań zauważono, że poziom istotności osiągnął wartość $p \leq 0,05$ w przypadku badania zależności zawartości suchej masy, wysokości roślin oraz wysokości osadzenia kolby (tab. 4.4). Zatem na tej podstawie stwierdzono, że dany nawóz ma znaczący wpływ na otrzymane wyniki. Natomiast w 2 roku badań wyniki uznano za istotne statystycznie w przypadku wszystkich badanych cech.

Tabela 4.4. Wyniki testu ANOVA dla ilości zebranego ziarna, zawartości suchej masy, wysokości rośliny i wysokości osadzenia kolby (w przypadku poziomu istotności $p \leq 0,05$ wynik zaznaczono na czerwono) [opracowanie własne]

Badana zmienna	Poziom istotności p w 1 roku badań	Poziom istotności p w 2 roku badań
Ilość zebranego ziarna	0,139153	0,007452
Zawartość suchej masy	0,000000	0,000000
Wysokość rośliny	0,000003	0,000000
Wysokość osadzenia kolby	0,001093	0,000976

W wyniku przeprowadzonych badań okazało się, że nie wszystkie wartości średnie związane z zastosowanymi nawozami są równe. Dlatego w celu wyodrębnienia średnich różniących się od siebie statystycznie zastosowano test post-hoc - Test Tukeya (tab. 4.5). Biorąc pod uwagę ilość zebranego ziarna kukurydzy w 2 roku badań, zauważono, że średnia po zastosowaniu pofermentu różni się istotnie od średniej po zastosowaniu pofermentu + NPK, NPK oraz kontroli NPK + mikroelementów. Średnie dla pozostałych porównań nie różnią się istotnie (wartości p są większe od 0,05). Znaczne zróżnicowanie wyników istotnych statystycznie zauważono w przypadku zawartości suchej masy, wysokości roślin oraz wysokości osadzenia kolby. W przypadku pierwszego wymienionego parametru, stwierdzono, że wynik nie różnił się istotnie statystycznie jedynie w przypadku porównania pofermentu + NPK i kontroli NPK + mikroelementów. Biorąc pod uwagę dwie pozostałe cechy kukurydzy, zauważono, że w 1 i 2 roku badań wyniki uznane za istotne statystycznie występowały w większości przypadków między tymi samymi parami.

Tabela 4.5. Wyniki Testu Tukeya (wyniki zaznaczone na czerwono oznaczają średnie różniące się od siebie statystycznie przy $p \leq 0,05$) [opracowanie własne]

Ilość zebranego ziarna						
1 rok badań						
	Nawóz	1	2	3	4	5
1	Poferment		0,574081	0,119222	0,202293	0,386015
2	Poferment + NPK	0,574081		0,748282	0,909924	0,995848
3	Poferment + NPK + mikroelementy	0,119222	0,748282		0,995811	0,909640
4	NPK	0,202293	0,909924	0,995811		0,986975
5	Kontrola NPK + mikroelementy	0,386015	0,995848	0,909640	0,986975	
2 rok badań						
	Nawóz	1	2	3	4	5
1	Poferment		0,088697	0,005314	0,021103	0,040396
2	Poferment + NPK	0,088697		0,394353	0,878812	0,984503
3	Poferment + NPK + mikroelementy	0,005314	0,394353		0,878812	0,668698
4	NPK	0,021103	0,878812	0,878812		0,992448
5	Kontrola NPK + mikroelementy	0,040396	0,984503	0,668698	0,992448	
Zawartość suchej masy						
1 rok badań						
	Nawóz	1	2	3	4	5
1	Poferment		0,000177	0,000176	0,000177	0,000176
2	Poferment + NPK	0,000177		0,000176	0,000176	0,082564
3	Poferment + NPK + mikroelementy	0,000176	0,000176		0,000176	0,000186
4	NPK	0,000177	0,000176	0,000176		0,000176
5	Kontrola NPK + mikroelementy	0,000176	0,082564	0,000186	0,000176	
2 rok badań						
	Nawóz	1	2	3	4	5
1	Poferment		0,000413	0,000176	0,000276	0,000276
2	Poferment + NPK	0,000413		0,001204	0,000176	0,965942

3	Poferment + NPK + mikroelementy	0,000176	0,001204		0,000176	0,002657
4	NPK	0,000276	0,000176	0,000176		0,000176
5	Kontrola NPK + mikroelementy	0,000276	0,965942	0,002657	0,000176	
Wysokość rośliny						
1 rok badań						
	Nawóz	1	2	3	4	5
1	Poferment		0,148652	0,955973	0,000202	0,001920
2	Poferment + NPK	0,148652		0,378238	0,000177	0,000226
3	Poferment + NPK + mikroelementy	0,955973	0,378238		0,000186	0,000848
4	NPK	0,000202	0,000177	0,000186		0,074699
5	Kontrola NPK + mikroelementy	0,001920	0,000226	0,000848	0,074699	
2 rok badań						
	Nawóz	1	2	3	4	5
1	Poferment		0,044766	0,395070	0,000178	0,000886
2	Poferment + NPK	0,044766		0,582223	0,000176	0,000182
3	Poferment + NPK + mikroelementy	0,395070	0,582223		0,000176	0,000231
4	NPK	0,000178	0,000176	0,000176		0,014398
5	Kontrola NPK + mikroelementy	0,000886	0,000182	0,000231	0,014398	
Wysokość osadzenia kolby						
1 rok badań						
	Nawóz	1	2	3	4	5
1	Poferment		0,055280	0,004187	0,938412	0,760534
2	Poferment + NPK	0,055280		0,464058	0,017321	0,313436
3	Poferment + NPK + mikroelementy	0,004187	0,464058		0,001562	0,024061
4	NPK	0,938412	0,017321	0,001562		0,359439
5	Kontrola NPK + mikroelementy	0,760534	0,313436	0,024061	0,359439	
2 rok badań						
	nawóz	1	2	3	4	5
1	poferment		0,021098	0,039159	0,401107	0,663764
2	poferment + NPK	0,021098		0,993724	0,001570	0,168736
3	poferment + NPK + mikroelementy	0,039159	0,993724		0,002606	0,295086
4	NPK	0,401107	0,001570	0,002606		0,057075
5	kontrola NPK + mikroelementy	0,663764	0,168736	0,295086	0,057075	

W celu określenia wzajemnych powiązań pomiędzy zmiennymi w zależności od zastosowanego nawozu zastosowano analizę korelacji. Przyjęto skalę współczynnika korelacji według Stanisza (1998):

$r_{xy} = 0$ – zmienne nie są skorelowane,

$0 < r_{xy} < 0,1$ – korelacja nikła,

$0,1 \leq r_{xy} < 0,3$ – korelacja słaba,

$0,3 \leq r_{xy} < 0,5$ – korelacja przeciętna,

$0,5 \leq r_{xy} < 0,7$ – korelacja wysoka,

$0,7 \leq r_{xy} < 0,9$ – korelacja bardzo wysoka,

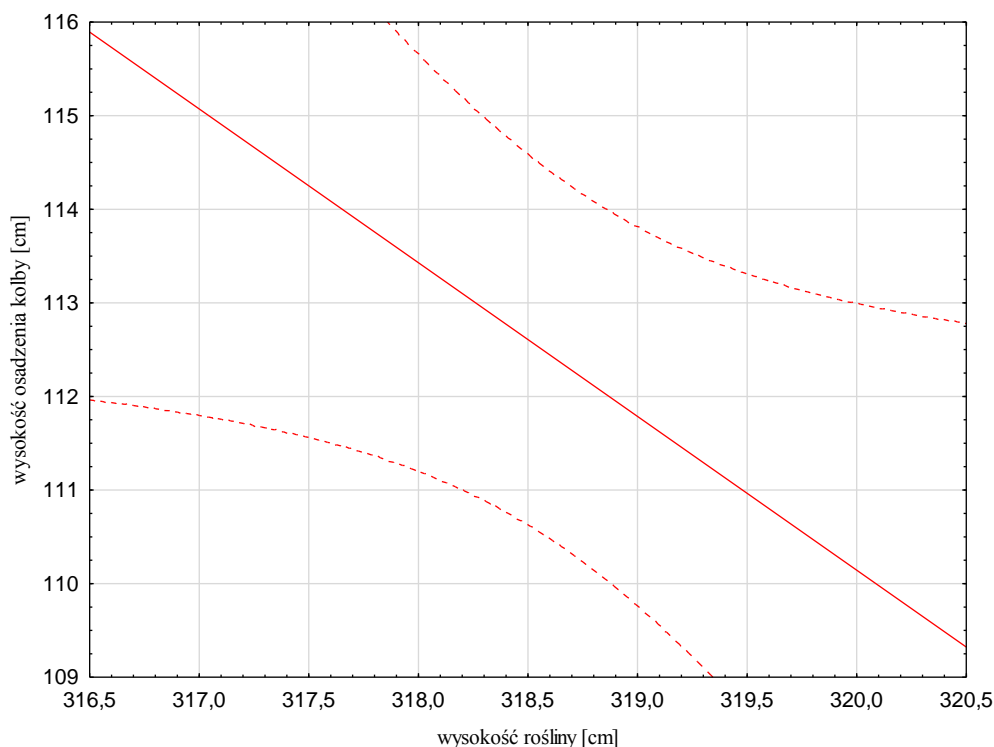
$0,9 \leq r_{xy} < 1$ – korelacja prawie pewna,

$r_{xy} = 1$ – korelacja pewna.

Analizując ilość zebranego ziarna kukurydzy, zawartość suchej masy, wysokość rośliny oraz wysokość osadzenia kolby po zastosowaniu pofermentu zauważono, że istotna korelacja ujemna zachodzi pomiędzy wysokością osadzenia kolby oraz wysokością rośliny w 1 roku badań, a uzyskany wynik świadczy o korelacji prawie pewnej (tab. 4.6). Zatem na tej podstawie można stwierdzić, że im większa wysokość rośliny, tym mniejsza wysokość osadzenia kolby, co zostało zilustrowane na wykresie rozrzutu (rys. 4.9). Rysunek zawiera wykres prostej regresji wysokości rośliny wysokości osadzenia kolby. Na wykresie zaznaczono też 95% przedział ufności linii regresji (obszar zaznaczony przerywanymi liniami).

Tabela 4.6. Analiza korelacji zmiennych po zastosowaniu pofermentu (w przypadku poziomu istotności $p \leq 0,05$ wynik zaznaczono na czerwono) [opracowanie własne]

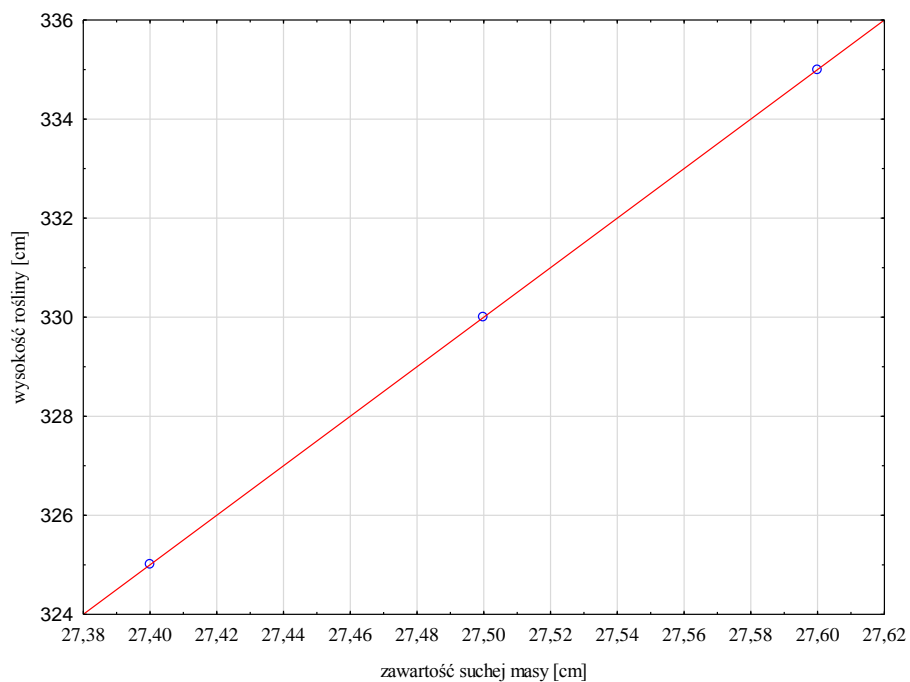
Poferment				
1 rok badań				
Zmienna	Ilość zebranego ziarna kukurydzy	Zawartość suchej masy	Wysokość rośliny	Wysokość osadzenia kolby
Ilość zebranego ziarna kukurydzy	1	0,951199	-0,123258	0,197431
Zawartość suchej masy	0,951199	1	0,188982	-0,114708
Wysokość rośliny	-0,123258	0,188982	1	-0,997176
Wysokość osadzenia kolby	0,197431	-0,114708	-0,997176	1
2 rok badań				
Zmienna	Ilość zebranego ziarna kukurydzy	Zawartość suchej masy	Wysokość rośliny	Wysokość osadzenia kolby
Ilość zebranego ziarna kukurydzy	1	-0,67843	-0,980059	-0,297024
Zawartość suchej masy	-0,67843	1	0,810885	-0,5
Wysokość rośliny	-0,980059	0,810885	1	0,101361
Wysokość osadzenia kolby	-0,297024	-0,5	0,101361	1



Rysunek 4.5. Wykres rozrzutu wysokości rośliny i wysokości osadzenia kolby, w cm [opracowanie własne]

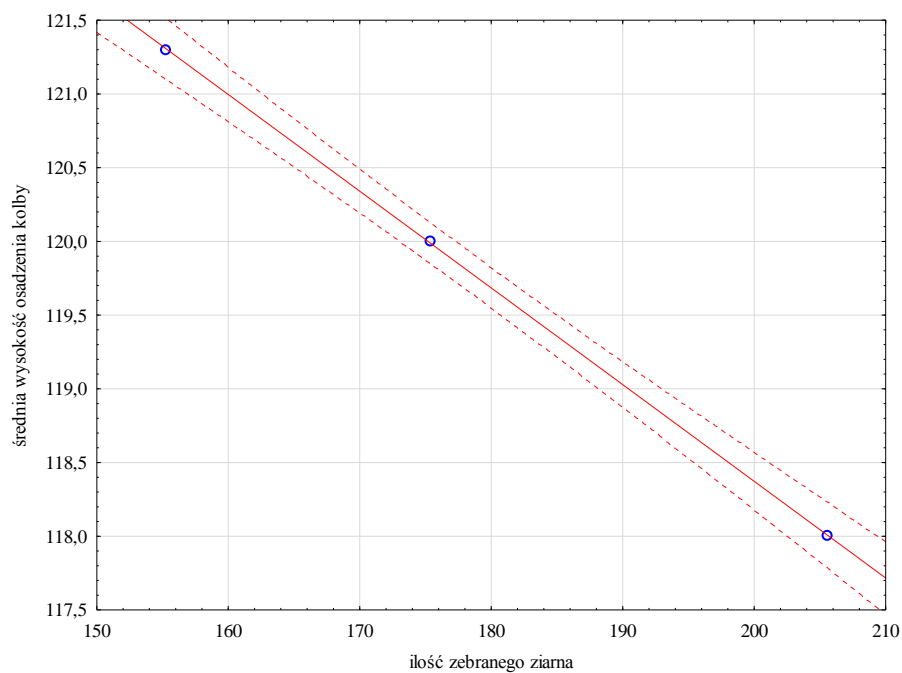
Tabela 4.7. Analiza korelacji zmiennych po zastosowaniu pofermentu + NPK [opracowanie własne]

Poferment + NPK				
1 rok badań				
Zmienna	Ilość zebranego ziarna kukurydzy	Zawartość suchej masy	Wysokość rośliny	Wysokość osadzenia kolby
Ilość zebranego ziarna kukurydzy	1	0,623842	0,623842	-0,469310
Zawartość suchej masy	0,623842	1	1,000000	0,397360
Wysokość rośliny	0,623842	1,000000	1	0,397360
Wysokość osadzenia kolby	-0,469310	0,397360	0,397360	1
2 rok badań				
Zmienna	Ilość zebranego ziarna kukurydzy	Zawartość suchej masy	Wysokość rośliny	Wysokość osadzenia kolby
Ilość zebranego ziarna kukurydzy	1	0,973936	-0,956864	-0,999968
Zawartość suchej masy	0,973936	1	-0,866025	-0,972088
Wysokość rośliny	-0,956864	-0,866025	1	0,959161
Wysokość osadzenia kolby	-0,999968	-0,972088	0,959161	1



Rysunek 4.6. Wykres rozrzutu zawartości suchej masy i wysokości rośliny [opracowanie własne]

W przypadku nawożenia roślin pofermentem + NPK w 1 roku badań stwierdzono, że istnieje istotna statystycznie dodatnia korelacja pewna pomiędzy wysokością roślin a zawartością suchej masy (tab. 4.7; rys. 4.10). Natomiast w 2 roku badań zauważono, że wraz ze wzrostem ilości zebranego ziarna kukurydzy, maleje wysokość osadzenia kolby (rys. 4.11).



Rysunek 4.7. Wykres rozrzutu ilości zebranego ziarna i wysokości osadzenia kolby [opracowanie własne]

Tabela 4.8. Analiza korelacji zmiennych po zastosowaniu pofermentu + NPK + mikroelementów [opracowanie własne]

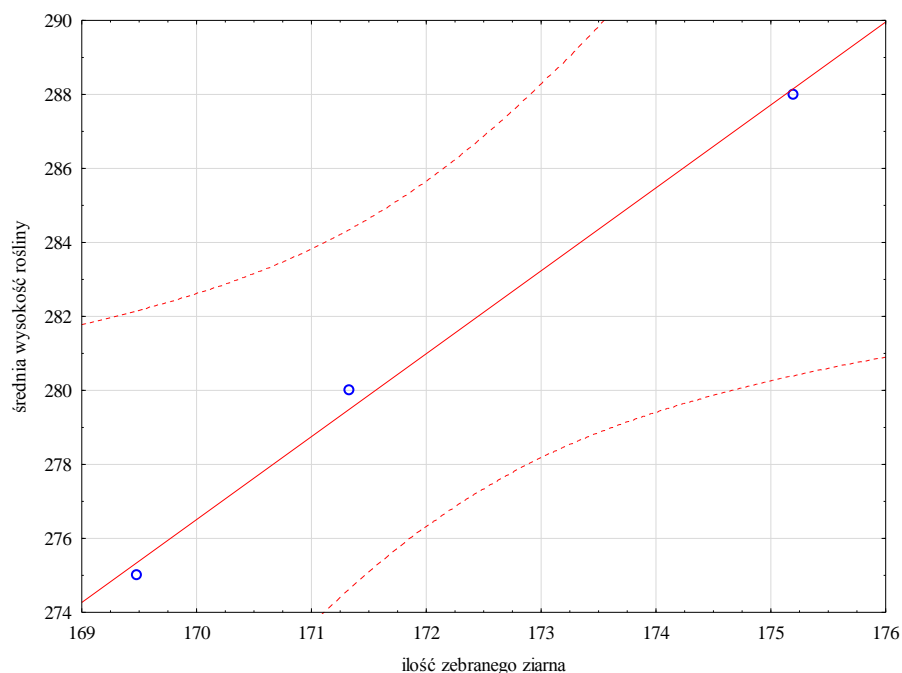
Poferment + NPK + mikroelementy				
1 rok badań				
Zmienna	Ilość zebranego ziarna kukurydzy	Zawartość suchej masy	Wysokość rośliny	Wysokość osadzenia kolby
Ilość zebranego ziarna kukurydzy	1	0,988519	0,846167	0,036710
Zawartość suchej masy	0,988519	1	0,755929	-0,114708
Wysokość rośliny	0,846167	0,755929	1	0,563621
Wysokość osadzenia kolby	0,036710	-0,114708	0,563621	1
2 rok badań				
Zmienna	Ilość zebranego ziarna kukurydzy	Zawartość suchej masy	Wysokość rośliny	Wysokość osadzenia kolby
Ilość zebranego ziarna kukurydzy	1	-0,408848	0,971793	0,800001
Zawartość suchej masy	-0,408848	1	-0,182092	-0,874639
Wysokość rośliny	0,971793	-0,182092	1	0,635934
Wysokość osadzenia kolby	0,800001	-0,874639	0,635934	1

Wyodrębnione zmienne charakteryzujące kukurydzę po zastosowaniu pofermentu + NPK + mikroelementów odznaczały się nieistotnymi statystycznie korelacjami (tab. 4.8).

W przypadku nawożenia kukurydzy NPK, stwierdzono istnienie dodatniej korelacji prawie pewnej pomiędzy ilością zebranego ziarna a wysokością rośliny (tab. 4.9, rys. 4.12).

Tabela 4.9. Analiza korelacji zmiennych po zastosowaniu NPK [opracowanie własne]

NPK				
1 rok badań				
Zmienna	Ilość zebranego ziarna kukurydzy	Zawartość suchej masy	Wysokość rośliny	Wysokość osadzenia kolby
Ilość zebranego ziarna kukurydzy	1	0,509771	0,997621	-0,979778
Zawartość suchej masy	0,509771	1	0,449252	-0,327327
Wysokość rośliny	0,997621	0,449252	1	-0,991241
Wysokość osadzenia kolby	-0,979778	-0,327327	-0,991241	1
2 rok badań				
Zmienna	Ilość zebranego ziarna kukurydzy	Zawartość suchej masy	Wysokość rośliny	Wysokość osadzenia kolby
Ilość zebranego ziarna kukurydzy	1	0,895558	0,984045	0,895508
Zawartość suchej masy	0,895558	1	0,960434	0,603957
Wysokość rośliny	0,984045	0,960434	1	0,802036
Wysokość osadzenia kolby	0,895508	0,603957	0,802036	1



Rysunek 4.8. Wykres rozrzutu ilości zebranego ziarna i wysokości rośliny [opracowanie własne]

Badane zmienne po nawożeniu kukurydzy NPK + mikroelementami odznaczały się nieistotnymi statystycznie korelacjami (tab. 4.10).

Tabela 4.10. Analiza korelacji zmiennych po zastosowaniu NPK + mikroelementów [opracowanie własne]

kontrola NPK + mikroelementy				
1 rok badań				
Zmienna	Ilość zebranego ziarna kukurydzy	Zawartość suchej masy	Wysokość rośliny	Wysokość osadzenia kolby
Ilość zebranego ziarna kukurydzy	1	0,952158	0,986050	0,919830
Zawartość suchej masy	0,952158	1	0,989743	0,755929
Wysokość rośliny	0,986050	0,989743	1	0,841698
Wysokość osadzenia kolby	0,919830	0,755929	0,841698	1
2 rok badań				
Zmienna	Ilość zebranego ziarna kukurydzy	Zawartość suchej masy	Wysokość rośliny	Wysokość osadzenia kolby
Ilość zebranego ziarna kukurydzy	1	0,895558	0,984045	0,895508
Zawartość suchej masy	0,895558	1	0,960434	0,603957
Wysokość rośliny	0,984045	0,960434	1	0,802036
Wysokość osadzenia kolby	0,895508	0,603957	0,802036	1

Przeprowadzone badania pozwoliły także na ocenę kondycji i zdrowotności uprawianej kukurydzy, a także ocenę porażenia chorobami roślin w zależności od zastosowanego nawozu (tab. 4.11, 4.12).

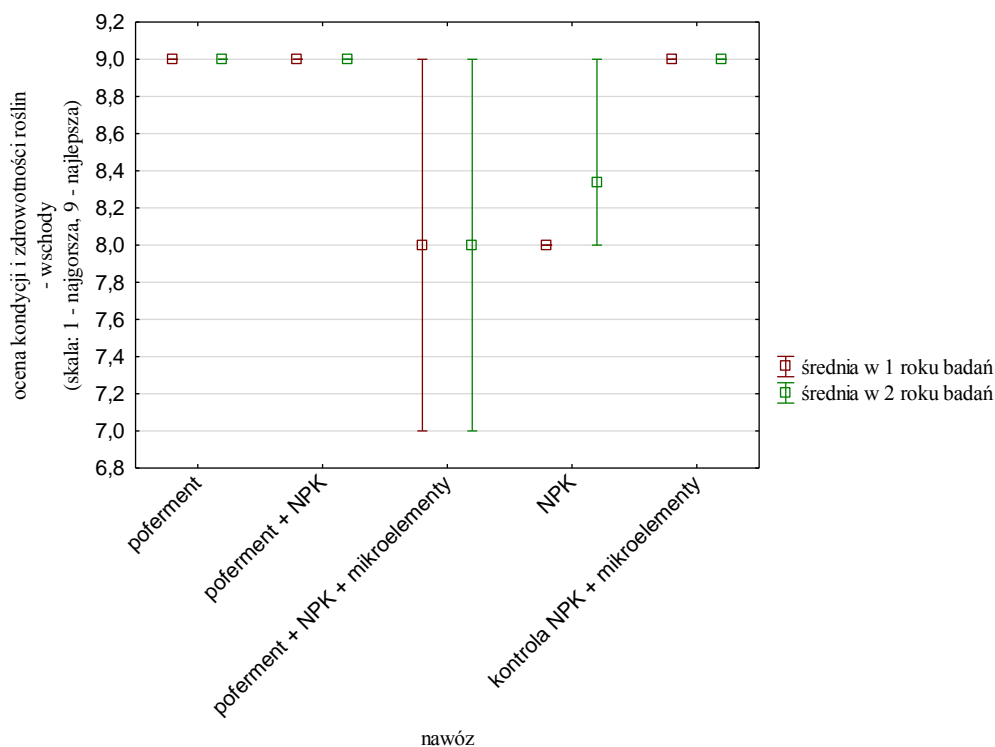
Odpowiednio wyrównana obsada oraz równomierne wschody podczas uprawy kukurydzy stanowią podstawę do osiągnięcia wysokich i dobrej jakości plonów. Według Beresia i in. (2015) niektóre nawozy, a przede wszystkim fosforan amonu, dostarczają dwóch składników - azotu w formie amonowej (N-NH₄) i fosforu. Połączenie wspomnianych dwóch składników wpływa na większy pobór fosforu w początkowych fazach rozwoju rośliny. Dlatego należy dbać o odpowiednie dawki wybierając te nawozy, ponieważ zbyt duże przyczyniają się do zaburzenia wschodów. Na podstawie przeprowadzonych badań, zauważono, że rośliny nawożone pofermentem, pofermentem + NPK, kontrola NPK + mikroelementami odznaczają się najlepszą oceną (rys. 4.13). Najgorsze wyniki odnotowano w przypadku nawożenia pofermentem + NPK + mikroelementami. Zaobserwowane zjawisko świadczy o optymalnych dawkach nawozowych w przypadku zastosowania pofermentu, pofermentu + NPK oraz kontroli NPK + mikroelementów.

Tabela 4.11. Ocena kondycji i zdrowotności roślin oraz porażenia chorobami w 1 roku badań [opracowanie własne]

Nawóz	Nr polećka	Ocena kondycji i zdrowotności roślin (skala: 1 - najgorsza, 9 - najlepsza)			Ocena porażenie chorobami (skala: 1 - roślina podatna, 9 - roślina odporna)		
		Wschody	Wczesny wigor	Stan przed zbiorem	Plamistość pochw liściowych	Żółta plamistość liści	Drobna plamistość
Poferment	1	9	8	7	8	7	7
	2	9	9	7	7	6	6
	3	9	9	6	7	6	7
Poferment + NPK	1	9	9	8	8	7	7
	2	9	9	8	7	7	8
	3	9	9	7	8	6	7
Poferment + NPK + mikroelementy	1	9	9	8	7	7	8
	2	8	8	8	8	7	8
	3	7	7	8	7	7	7
NPK	1	8	8	6	7	7	7
	2	8	8	6	6	6	7
	3	8	8	6	6	6	7
Kontrola NPK + mikroelementy	1	9	9	7	7	6	6
	2	9	9	7	7	7	6
	3	9	9	7	6	7	7

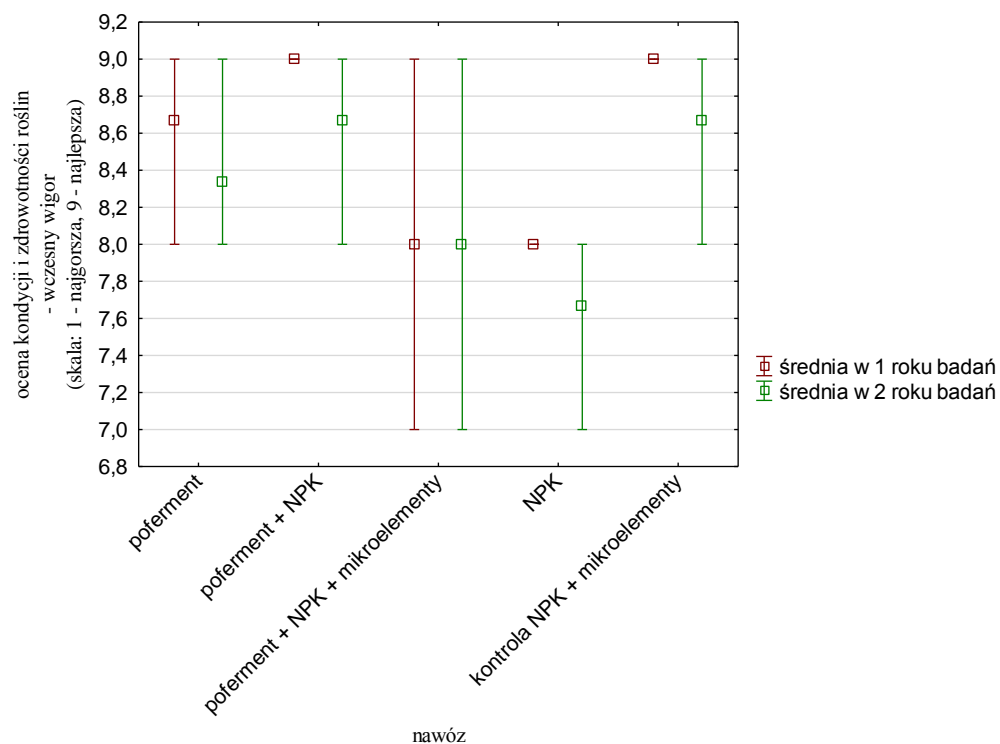
Tabela 4.12. Ocena kondycji i zdrowotności roślin oraz porażenia chorobami w 2 roku badań [opracowanie własne]

Nawóz	Nr poletka	Ocena kondycji i zdrowotności roślin (skala: 1 - najgorsza, 9 - najlepsza)			Ocena porażenia chorobami (skala: 1 - roślina podatna, 9 - roślina odporna)		
		Wschody	Wczesny wigor	Stan przed zbiorem	Plamistość pochw liściowych	Żółta plamistość liści	Drobna plamistość
Poferment	1	9	8	6	7	7	6
	2	9	8	7	6	7	6
	3	9	9	6	7	6	6
Poferment + NPK	1	9	9	7	7	7	7
	2	9	8	8	7	6	7
	3	9	9	7	8	6	7
Poferment + NPK + mikroelementy	1	9	9	8	7	7	8
	2	8	8	8	8	7	8
	3	7	7	8	7	7	7
NPK	1	8	7	6	6	6	7
	2	9	8	7	6	6	6
	3	8	8	6	6	6	7
Kontrola NPK + mikroelementy	1	9	8	6	6	6	6
	2	9	9	7	6	6	6
	3	9	9	7	6	7	6



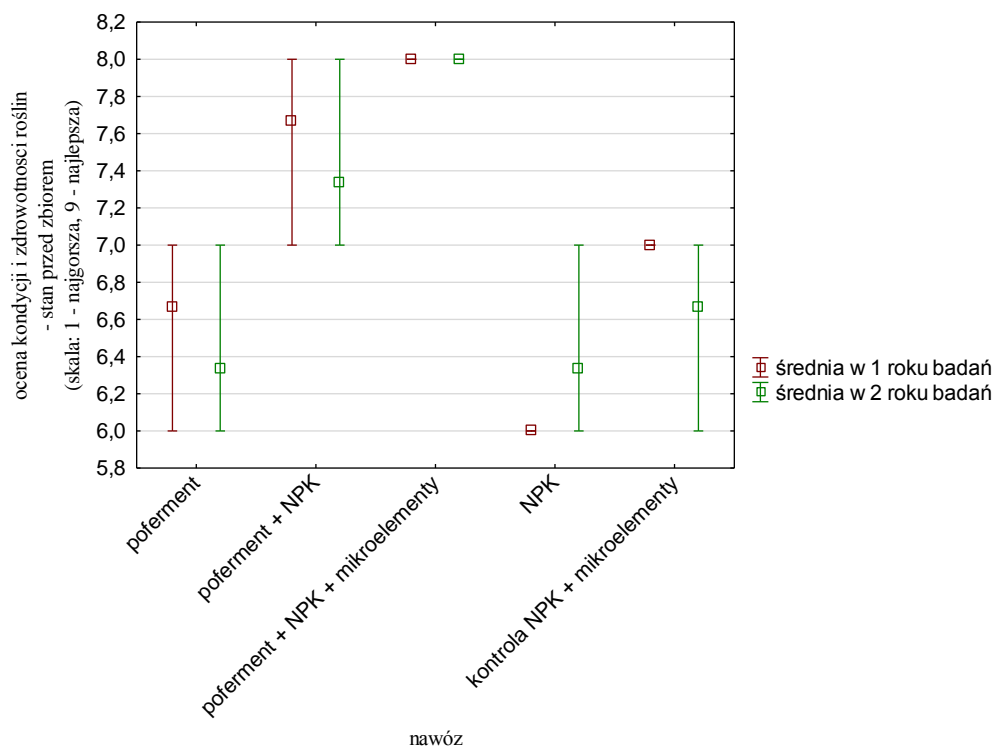
Rysunek 4.9. Średnia ocena wschodów kukurydzy w zależności od zastosowanego nawozu [opracowanie własne]

Wczesny wigor stanowi ważną cechę odmian zarówno do uprawy na ziarno, jak i na kiszonkę. Odmiany, które charakteryzują się tą cechą kiełkują i rozwijają się nawet w warunkach chłódów wiosennych (Warzecha, 2022). Analizując wyniki badań ze względu na tę cechę zauważono, że najlepsze wyniki odnotowano w przypadku roślin nawożonych pofermentem + NPK oraz NPK + mikroelementami. Nieznacznie gorszymi odznaczała się kukurydza po zastosowaniu pofermentu (rys. 4.14). Natomiast najgorsze wyniki zauważono w przypadku zastosowania pofermentu + NPK + mikroelementów oraz NPK.



Rysunek 4.10. Średnia ocena wczesnego wigoru w zależności od zastosowanego nawozu [opracowanie własne]

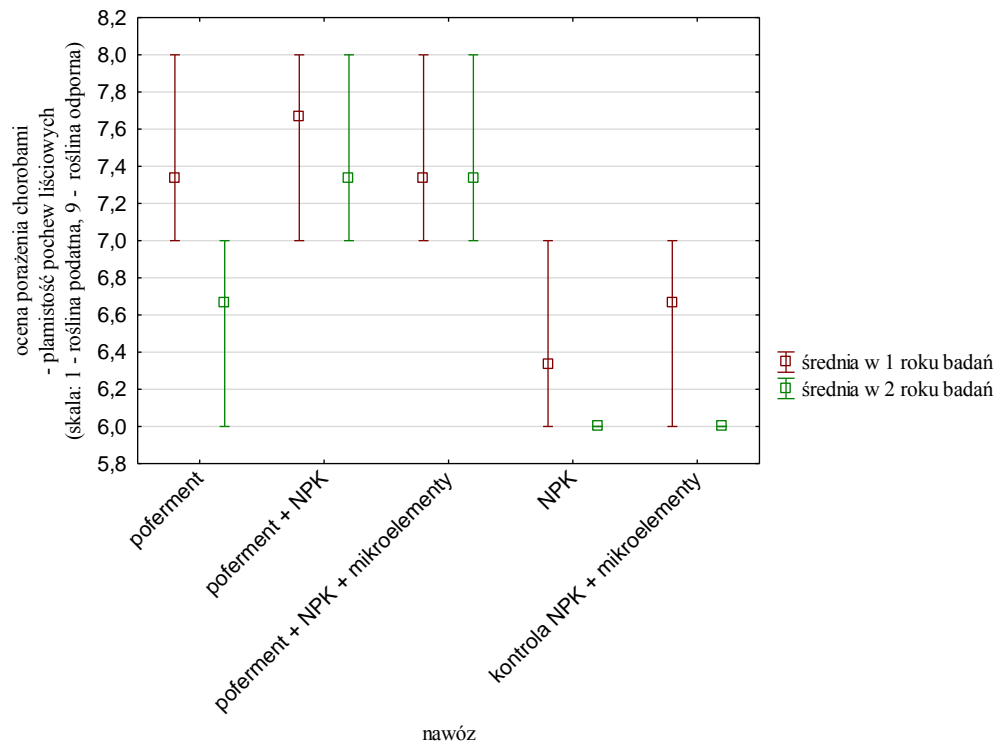
Stwierdzono, że kukurydza nawożona pofermentem + NPK + mikroelementami odznaczała się najlepszym stanem przed zbiorem, zarówno w 1, jak i 2 roku badań (rys. 4.15). Natomiast najgorszym odznaczały się rośliny po zastosowaniu NPK. Wynik oceny stanu przed zbiorem jest subiektywny, dlatego w celu mierzalnej oceny ostatecznej jakości kukurydzy należy sugerować się parametrami fizykochemicznymi, które przeprowadzono. Zaobserwowano także, że wyniki omawianej cechy są zbliżone do wyników w zakresie wysokości roślin i wysokości osadzenia kolby. Może to mieć związek z tworzeniem zbyt dużej ilości zielonej masy i nieprawidłowej wizualnej ocenie dotyczącej przenawożonych roślin.



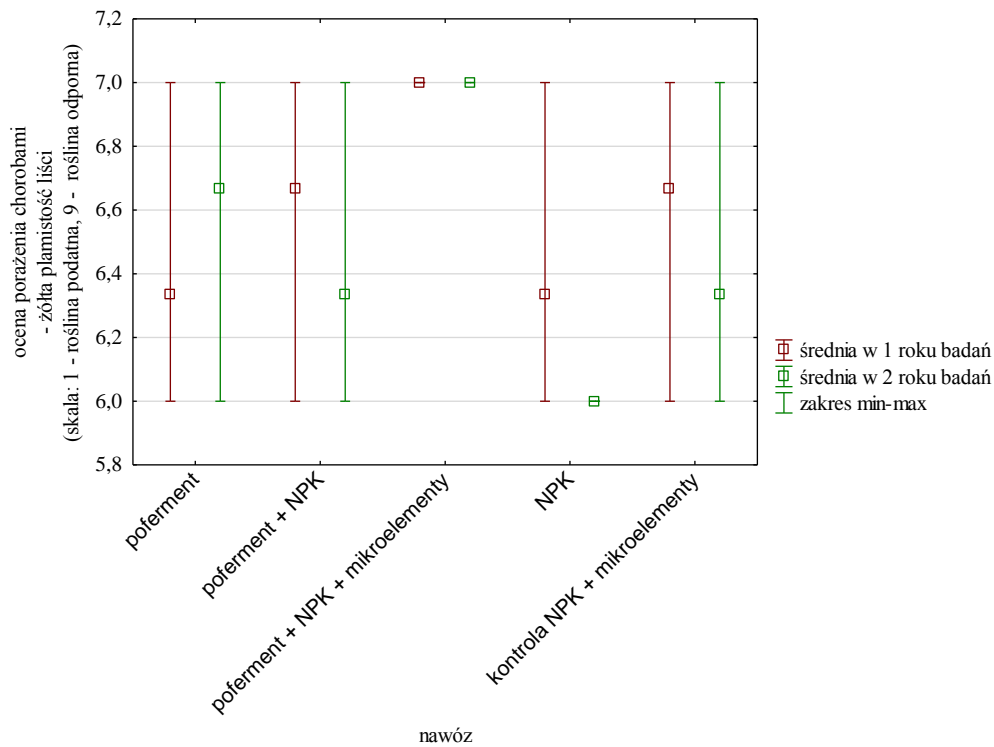
Rysunek 4.11. Średnia ocena stanu przed zbiorem w zależności od zastosowanego nawozu [opracowanie własne]

Plamistość pochew liściowych to bakteryjna choroba kukurydzy wywoływana przez *Pseudomonas andropogonii* (E.F Smith) Stapp i *Pseudomonas syringae* van Hall. Zauważono, że rośliny nawożone NPK cechują się najmniejszą odpornością na plamistość pochew liściowych (rys. 4.16), natomiast najlepszą kukurydza po nawożeniu pofermentem + NPK. Wzrost nasilenia występowania plamistości pochew liściowych zauważa się w latach charakteryzujących się podwyższonymi temperaturami oraz podwyższoną wilgotnością (Bereś i in., 2016). Zauważono, że w 2 roku badań wyniki w każdym badanym przypadku były gorsze w porównaniu do wyników uzyskanych po 1 roku badań. Dlatego na tej podstawie można stwierdzić, że w dużym stopniu do zaobserwowanego zjawiska przyczyniły się warunki pogodowe. Żółta plamistość liści to choroba grzybowa, której sprawcą jest grzyb *Helminthosporium turcicum*. Na podstawie wyników badań, zauważono, że rośliny nawożone pofermentem + NPK + mikroelementami odznaczają się najlepszą odpornością na tę chorobę. Stwierdzono także, że poferment nie wpływa na podwyższenie odporności kukurydzy w ochronie przed tą chorobą (rys. 4.17). Drobną plamistość liści to choroba wywołana grzybem *Kabatiella zea*. Przeprowadzone badania ukazały, że kukurydza po nawożeniu pofermentem + NPK + mikroelementami jest najmniej narażona na jej występowanie. Rośliny

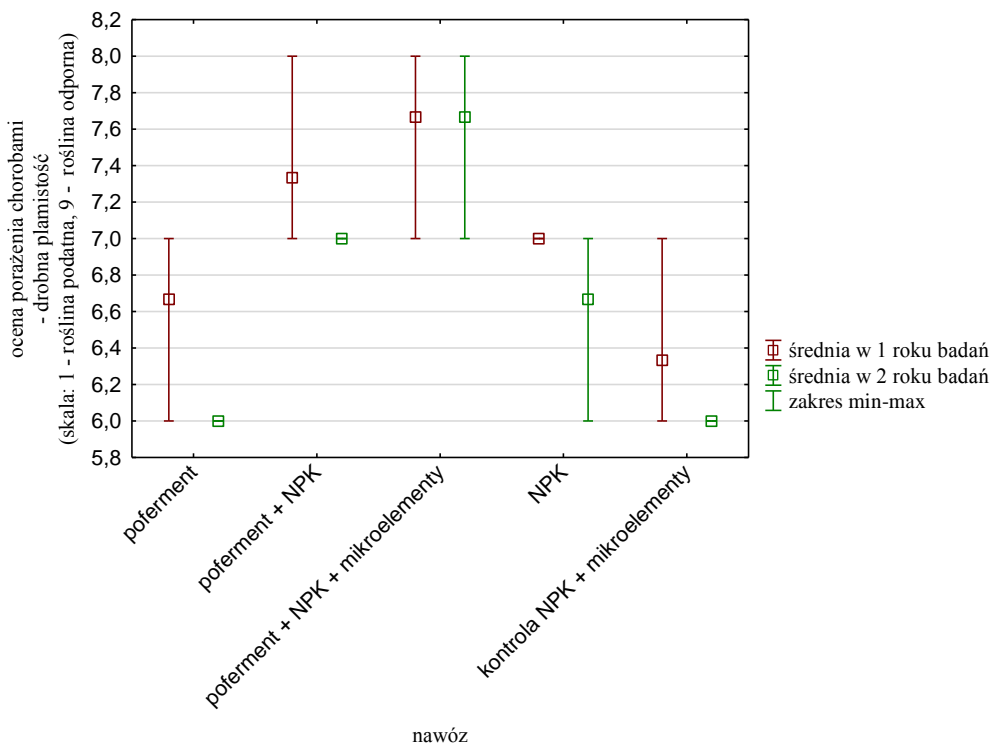
po nawożeniu pofermentem odznaczają się słabymi wynikami w omawianej klasyfikacji (rys. 4.18).



Rysunek 4.12. Średnia ocena porażenia plamistością pochwów liściowych w zależności od zastosowanego nawozu [opracowanie własne]



Rysunek 4.13. Średnia ocena porażenia żółtą plamistością liści w zależności od zastosowanego nawozu [opracowanie własne]



Rysunek 4.14. Średnia ocena porażenia drobną plamistością w zależności od zastosowanego nawozu [opracowanie własne]

Analizując wpływ danego nawozu na ocenę kondycji i zdrowotności roślin oraz podatność na porażenie chorobami i przeprowadzając analizę wariancji ANOVA, zauważono, że w 1 roku badań poziom istotności osiągnął wartość $p \leq 0,05$ w przypadku oceny wschodów i stanu przed zbiorem, natomiast w 2 roku badań również w ocenie stanu przed zbiorem, a także porażenia chorobami takimi jak: plamistość pochw liściowych oraz drobna plamistość (tab. 4.13). Biorąc pod uwagę dwa lata badań można stwierdzić, że rodzaj nawozu zdecydowanie wpływa na stan przed zbiorem kukurydzy. Stwierdzono także, że rodzaj nawożenia nie ma wpływu na wczesny wigor roślin oraz na stopień porażenia chorobą taką jak żółta plamistość liści.

Tabela 4.13. Wyniki testu ANOVA dla oceny kondycji i zdrowotności roślin oraz porażenia chorobami (w przypadku poziomu istotności $p \leq 0,05$ wynik zaznaczono na czerwono) [opracowanie własne]

Badana zmienna	Poziom istotności p w 1 roku badań	Poziom istotności p w 2 roku badań
Wschody	0,024487	0,109375
Wczesny wigor	0,079983	0,363949
Stan przed zbiorem	0,000389	0,010683
Plamistość pochw liściowych	0,092368	0,006996
Żółta plamistość liści	0,512105	0,146552
Drobna plamistość	0,065512	0,001012

Na podstawie przeprowadzonego testu ANOVA i wyodrębnieniu wyników istotnych statystycznie, przeprowadzono badanie Testem Tukeya, co przełożyło na możliwość sprawdzenia średnich różniących się od siebie statystycznie (tab. 4.14).

Tabela 4.14. Wyniki Testu Tukeya (wyniki zaznaczone na czerwono oznaczają średnie różniące się od siebie statystycznie przy $p \leq 0,05$) [opracowanie własne]

Wschody						
1 rok badań						
	Nawóz	1	2	3	4	5
1	Poferment		1,000000	0,116879	0,116879	1,000000
2	Poferment + NPK	1,000000		0,116879	0,116879	1,000000
3	Poferment + NPK + mikroelementy	0,116879	0,116879		1,000000	0,116879
4	NPK	0,116879	0,116879	1,000000		0,116879
5	Kontrola NPK + mikroelementy	1,000000	1,000000	0,116879	0,116879	
Stan przed zbiorem						
1 rok badań						
	nawóz	1	2	3	4	5
1	poferment		0,045440	0,008299	0,242270	0,794084
2	poferment + NPK	0,045440		0,794084	0,001790	0,242270
3	poferment + NPK + mikroelementy	0,008299	0,794084		0,000519	0,045440
4	NPK	0,242270	0,001790	0,000519		0,045440
5	kontrola NPK + mikroelementy	0,794084	0,242270	0,045440	0,045440	
2 rok badań						
	Nawóz	1	2	3	4	5
1	Poferment		0,200333	0,018065	1,000000	0,927671
2	Poferment + NPK	0,200333		0,539379	0,200333	0,539379
3	Poferment + NPK + mikroelementy	0,018065	0,539379		0,018065	0,061142
4	NPK	1,000000	0,200333	0,018065		0,927671
5	Kontrola NPK + mikroelementy	0,927671	0,539379	0,061142	0,927671	
Plamistość pochew liściowych						
2 rok badań						
	Nawóz	1	2	3	4	5
1	Poferment		0,411288	0,411288	0,411288	0,411288
2	Poferment + NPK	0,411288		1,000000	0,028687	0,028687
3	Poferment + NPK + mikroelementy	0,411288	1,000000		0,028687	0,028687
4	NPK	0,411288	0,028687	0,028687		1,000000
5	Kontrola NPK + mikroelementy	0,411288	0,028687	0,028687	1,000000	
Drobna plamistość						
2 rok badań						
	Nawóz	1	2	3	4	5
1	Poferment		0,045440	0,001790	0,242270	1,000000
2	Poferment + NPK	0,045440		0,242270	0,794084	0,045440
3	Poferment + NPK + mikroelementy	0,001790	0,242270		0,045440	0,001790
4	NPK	0,242270	0,794084	0,045440		0,242270
5	Kontrola NPK + mikroelementy	1,000000	0,045440	0,001790	0,242270	

W celu określenia wzajemnych powiązań pomiędzy zmiennymi w zależności od zastosowanego nawozu zastosowano analizę korelacji (tab. 4.15). Wynik przyjęto za istotny statystycznie w przypadku gdy $p \leq 0,05$. Zauważono, że wyodrębniono jedynie korelacje pewne pomiędzy zmiennymi, dodatnie i ujemne.

Tabela 4.15. Analiza korelacji zmiennych po zastosowaniu danego nawozu [opracowanie własne]

Poferment	
1 rok badań	
Zmienne, pomiędzy którymi wystąpiła istotnie statystycznie korelacja	Współczynnik korelacji
Wczesny wigor - plamistość pochw liściowych	-1
Wczesny wigor - żółta plamistość liści	-1
Żółta plamistość liści - plamistość pochw liściowych	1
2 rok badań	
Wczesny wigor - żółta plamistość liści	-1
Poferment + NPK	
1 rok badań	
Stan przed zbiorem – żółta plamistość liści	1
Drobna plamistość – plamistość pochw liściowych	-1
2 rok badań	
Wczesny wigor – stan przed zbiorem	-1
Poferment + NPK + mikroelementy	
1 rok badań	
Wschody – wczesny wigor	1
2 rok badań	
Wschody – wczesny wigor	1
NPK	
1 rok badań	
Żółta plamistość liści – plamistość pochw liściowych	1
2 rok badań	
Stan przed zbiorem - wschody	1
Drobna plamistość - wschody	1
Drobna plamistość – stan przed zbiorem	-1
Kontrola NPK + mikroelementy	
1 rok badań	
Drobna plamistość – plamistość pochw liściowych	-1
2 rok badań	
Wczesny wigor – stan przed zbiorem	1

Biorąc pod uwagę poferment, stwierdzono, że wczesny wigor to cecha, która jest skorelowana z występowaniem niektórych chorób, a mianowicie, im lepsza ocena wczesnego wigoru tym gorsza odporność na występowanie plamistości pochw liściowych oraz żółtej plamistości liści. Stwierdzono, że skorelowane pary występują przeważnie w jednym roku badań, a dodatkowo w większości przypadków nie powtarzają się dla więcej niż jednego nawozu. Dlatego analiza korelacji przeprowadzona dla badanych cech nie jest miarodajna.

5. Podsumowanie pracy

Przeprowadzone badania oraz analiza statystyczna wyników świadczą o znaczącym wpływie rodzaju nawożenia na ostateczną jakość roślin. Wyniki testu ANOVA dla oceny kondycji i zdrowotności roślin ukazały, że na przestrzeni dwóch lat wyniki są istotne statystycznie jedynie w przypadku stanu przed zbiorem kukurydzy. W pozostałych przypadkach, wyniki są istotne statystycznie jedynie w jednym roku badań lub są nieistotne w żadnym z badanych lat. Warto też dodać, że wynik oceny kondycji i zdrowotności roślin jest subiektywny. Dlatego w celu mierzalnej ostatecznej jakości kukurydzy przeprowadzono badanie jej właściwości fizykochemicznych oraz określono wybrane parametry, od których ściśle zależą jej ostateczne cechy. Znaczenie tych cech również sugerują otrzymane wyniki testu ANOVA, ponieważ wyniki dotyczące zawartości suchej masy, wysokości roślin, wysokości osadzenia kolby okazały się istotne statystycznie w dwóch latach badawczych, natomiast ilość zebranego ziarna w drugim roku badań.

Dzięki umiejętnemu gospodarowaniu i stosowaniu różnorodnych zabiegów agrotechnicznych, w tym przede wszystkim nawożenia, możliwe jest także w pewnym stopniu korzystne uregulowanie warunków pogodowych i przyczynienie się do zwiększenia efektywności prowadzenia działalności rolniczej, a także poprawę otaczającego środowiska, zważając na to, że wykorzystanie pofermentu w celach nawozowych umożliwia zamknięcie obiegu składników pokarmowych w rolniczej przestrzeni produkcyjnej, co wpisuje się w zasadę zrównoważonego rozwoju. Wykorzystanie dobroczynnego pofermentu wpływa na zmniejszenie zużycia nawozów mineralnych i ogranicza wydobycie surowców kopalnych (fosforytów i gazu ziemnego) wykorzystywanych do produkcji nawozów [Creegan i inni 2023]. Dodatkowo jest też postrzegane jako metoda ograniczania emisji gazów cieplarnianych [Chen i inni 2023].

Dokładna znajomość chemicznych i fizycznych właściwości gleb, cech otaczającego klimatu oraz stosunków wodnych bezpośrednio przyczynia się do prawidłowości w rozwoju produkcji roślinnej. Wynika to z faktu, iż pierwszym krokiem w prowadzeniu gospodarstwa rolnego stanowi dobór uprawianych gatunków roślin, uwzględniając przy tym aspekty natury. Następny krok to czynności związane z agrotechniką, aż po zbiory plonów, które informują o prawidłowym przebiegu całego procesu. Według ekspertów zajmujących się uprawą kukurydzy, rolnik ma decydujący wpływ na kształtowanie poziomu plonowania tej rośliny. Wśród czynników wpływających na maksymalny plon kukurydzy wymienia się: dobór

odmiany (w 30%), zabiegi uprawowe (w 40%) oraz warunki klimatyczne (w 30%). Plantator ma pełen wpływ na pierwsze z dwóch wymienionych czynników.

6. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań własnych oraz analiz uzyskano następujące odpowiedzi na pytania sformułowane w problemie badawczym:

1. Skład chemiczny pofermentu w większości przypadków jest zbliżony do składu chemicznego substratu dostarczanego do komory fermentacyjnej. Oznacza to, że w procesie fermentacji nie odnotowano wyraźnych strat pierwiastków niezbędnych do prawidłowego wzrostu roślin. Warty uwagi jest fakt, że rtęć, która pojawia się w pofermencie, dostarczana jest do zbiornika wraz z substratem stałym (ilość rtęci zmierzona w pofermencie jest około 30 % większa niż w gnojowicy).
2. Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono przydatność nawozową pofermentu. Rośliny nim nawożone odznaczały się największą ilością zebranego ziarna (wynoszącą średnio 434 kg), optymalną zawartością suchej masy (średnio 28,4 %) w porównaniu do kukurydzy nawożonej pozostałymi nawozami. Dodatkowo charakteryzowały się odpowiednią wysokością roślin (średnio 3,15 m) i osadzenia kolb (średnio 1,12 m), a przy tym nie wykazywały tendencji do tworzenia zbyt dużej ilości zielonej masy. Obserwacje wskazały również na dobre wschody oraz zadowalający wczesny wigor. Jednakże słabą stroną nawożenia pofermentem okazała się dość niska odporność roślin na choroby, a w konsekwencji średnia ocena stanu przed zbiorem.
3. Poferment zawiera wszystkie niezbędne do prawidłowego rozwoju roślin pierwiastki, jednakże ich ilość jest różna, w zależności od składu chemicznego substratów wykorzystywanych w procesie fermentacyjnym zachodzącym w biogazowni rolniczej (średnio: N-3,24% s.m.; P-10,5 g·kg⁻¹ ś.m.; K-48,4 g·kg⁻¹ ś.m.). Dlatego konieczna jest systematyczna analiza składu chemicznego pofermentu, która umożliwi ustalenie prawidłowego jego dawkowania. Ponieważ nie ma możliwości w procesie produkcyjnym biogazu regulacji (zmniejszenia lub zwiększenia) ilości pojedynczych pierwiastków, dawkowanie pofermentu należy ustalić tak, aby uzyskać jak największą ilość najważniejszych dla uprawy danego gatunku roślin pierwiastków, a brakującą ilość należy uzupełnić wykorzystując nawozy sztuczne. Bazując na badaniach własnych oraz badaniach innych autorów, stwierdzono, że kukurydza to roślina wrażliwa na przenawożenie, dlatego tak ważne jest dozowanie optymalnych dawek.

4. Z porównania wyników badań terenowych z wykorzystania różnego nawożenia kukurydzy, a dodatkowo wykonania analizy gleb, wynika że stosowany poferment odznacza się dość optymalnym składem. Jednakże w celu osiągnięcia jak najwyższej jakości plonów, a przede wszystkim zwiększenia odporności rośliny na choroby i poprawy stanu przed zbiorem, zaleca się modyfikację nawożenia. Stwierdzono, że dawka azotu jest odpowiednia, jednakże w nawożeniu kukurydzy, poza tym pierwiastkiem, kluczowe znaczenie mają fosfor i potas. Pierwszy z nich wpływa dodatnio na liczbę i masę ziaren w kolbie, odporność roślin na stres środowiskowy m.in.: niskie temperatury, niedobory wody czy porażenie przez choroby grzybowe. Natomiast potas odpowiada za regulację gospodarki wodnej i gazowej w roślinie, zwiększa turgor komórek oraz odporność roślin na suszę, a w dodatku bierze udział w tworzeniu tkanki mechanicznej, przez co zmniejsza wyleganie i zwiększa odporność roślin na choroby i szkodniki. Analiza gleb wskazała na wysoki pobór tych pierwiastków, zwłaszcza potasu, dlatego należy zadbać o dodatkowe jego dostarczenie. Na podstawie badań nie stwierdzono niedoborów magnezu. Dodatkowo nawożenie pofermentem nie spowodowało wzrostu zakwaszenia gleb (w obu latach badań zmierzone pH gleby miało stałą wartość 6,7).

Literatura

- 1) Abubaker, J.; Risberg, K.; Pell, M. *Biogas residues as fertilisers—Effects on wheat growth and soil microbial activities*. Appl. Energy, 99, 126–134. 2012
- 2) Albuquerque A. J., Fuente C., Ferrer-Costa A., Carrasco L., Cegarra, AbadM., Bernal P. M., *Assessment of the fertilizer potential of digestates from farm and agroindustrial residues*. Biomass Bioen. 40, 181-189. 2012.
- 3) Arthurson V.: *Closing the global energy and nutrient cycles through application of biogas residue to agricultural land-potential benefit and drawbacks*. Energie, 2, 226-242. 2009.
- 4) Arvaniti F., Magkos F., Zampelas A., *Organic food: buying more safety or just peace of mind? A critical review of the literature*. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 46, 23-56. 2006.
- 5) Banasik P., Białowiec A. i inni: *Raport Biogaz w Polsce*. Biomass Media Group Sp. z o.o. Poznań 2020.
- 6) Baran S., Łabędowicz J., Krzywy E., *Przyrodnicze wykorzystywanie odpadów – podstawy teoretyczne i praktyczne*. PWRiL, Warszawa, 2011.
- 7) Bereś P. K., Gaj R., Grzebisz W., Kaniuczak Z., Mrówczyński M., Paradowski A., Pruszyński G., Pruszyński S., Siódmiak J., Sulewska H., Tekiel A., Wachowiak H. *Metodyka Integrowanej Produkcji Kukurydzy (wydanie drugie zmienione)*, Kaniuczak Z. i Pruszyński S. (red). Warszawa, 49 str., 2015.
- 8) Bereś P. K., Gaj R., Grzebisz W., Kaniuczak Z., Mrówczyński M., Paradowski A., Pruszyński G., Pruszyński S., Siódmiak J., Sulewska H., Tekiel A., Wachowiak H.: *Metodyka Integrowanej Produkcji Kukurydzy (wydanie trzecie zmienione)*, Kaniuczak Z. i Pruszyński S. (red.). Warszawa, 49 str., 2020.
- 9) Bereś P. K., Mrówczyński M., Kierzek R., Węgorek P., Sosnowska D., Korbas M., Matyjaszczyk E., Sulewska H., Adamczyk J., Szulc P., Warzecha R., Siekaniec Ł., Janiak W., Paradowski A., Fiedler Ż., Olejarski P., Krawczyk K., Trzmiel K., Zamojska J., Pruszyński G., Danielewicz J., Wachowiak H., Gorzała G., Obst A., Piątek E.: *Metodyka integrowanej ochrony i produkcji kukurydzy dla doradców*. Bereś P. K. Mrówczyński M. (red). Instytut Ochrony Roślin Państwowy Instytut Badawczy. Poznań 2016.
- 10) Block, K.: *Feststoffe direkt in den Fermenter*. Landwirtschaftliches Wochenblatt, 27/2002.

- 11) Brandt K., Molgaard P.: *Organic agriculture: does it enhance or reduce the nutritional value of plant foods?* Journal of the Science of Food and Agriculture, 81, 924-931. 2001.
- 12) Braun, R.: *Biogas – Methangärung organischer Abfallstoffe*; Springer Verlag Wien, New York, 1982.
- 13) Cebula J.: *Wybrane metody oczyszczania biogazu rolniczego i wysypiskowego*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- 14) Chambers B. J., Smith K. A., Pain B. F.: *Strategies to encourage better use of nitrogen in animal manures*. Soil Use Manage., 16, 157–161. 2000.
- 15) Chen, X.; Tao, T.; Zhou, J.; Yu, H.; Guo, H.; Chen, H. *Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Beef Cattle*. Sustainability **2023**, *15*, 11994.
- 16) Coelho, J.J.; Prieto, M.L.; Dowling, S.; Hennessy, A.; Casey, I.; Woodcock, T.; Kennedy, N. Physical-chemical traits, phytotoxicity and pathogen detection in liquid anaerobic digestates. Waste Manag., 78, 8–15. 2018
- 17) Creegan, E.F.; Flynn, R.; Brewer, C.E.; Heerema, R.J.; Darapuneni, M.; Velasco-Cruz, C. *Pecan Biomass and Dairy Manure Utilization: Compost Treatment and Soil In-Situ Comparisons of Selected Pecan Crop and Soil Variables*. Processes **2023**, *11*, 2046.
- 18) Crinnion W., *Organic foods contain higher levels of certain nutrients, lower levels of pesticides and may provide health benefits for the consumer*. Environ. Med. 15, 4-12., 2010.
- 19) Cukrowski A., Oniszk-Popławska A., Wiśniewski G., Zowski M.: *Mała biogazownia rolnicza*. EC BREC Instytut Energetyki Odnawialnej. Warszawa 2011.
- 20) Curkowski A., Oniszk-Popławska A., Wiśniewski G., Zowski M.: *Mała biogazownia rolnicza z lokalnym zagospodarowaniem ciepła odpadowego i masy pofermentacyjnej*. Fundacja Instytut na rzecz Ekorozwoju. Warszawa 2011.
- 21) Dubský, M.; Chaloupková, Š.; Kaplan, L.; Vondráčková, S.; Tlustoš, P. *Use of solid phase of digestate for production of growing horticultural substrates*. Hortic. Sci., 46, 34–42. 2019
- 22) Dudek P., Jonkisz J., Kochowski E., Majdak P., Oboza K.: *Urządzenia kogeneracyjne zasilane biogazem i pompy ciepła. Doświadczenia użytkownika w utrzymaniu sprawności technicznej i eksploatacyjnej instalacji*. Napędy i sterowanie nr 1, 2015.
- 23) *EBA Biomethane & Biogas Report 2015 published* dostępne pod adresem <https://www.europeanbiogas.eu/biogasreport2015/> (data wejścia 11.12.2020 r.)

- 24) Ermolaev, E.; Pell, M.; Smårs, S.; Sundberg, C.; Jönsson, H.; Smars, S.; Sundberg, C.; Jonsson, H.: *Greenhouse gas emission from covered windrow composting with controlled ventilation*. Waste Manag. Res., 30, 155–160. 2012
- 25) Evangelisti S., Lettieri P., Borello D., Clift R. *Life cycle assessment of energy from waste via anaerobic digestion: a UK case study*. Waste Management, 34. 226-237. 2014
- 26) Fischer T., Krieg A.: *Projektowanie i budowa biogazowni*. Krieg & Fischer Ingenieure GmbH, 2004.
- 27) Gadomska J., Sadowski T., Buczkowska M., *Ekologiczna żywność jako czynnik sprzyjający zdrowiu*. Probl. Hig. Epidem. 95, 556-560. 2014.
- 28) Głaszczka A., Wardal J. W., Romaniuk, W., Domasiewicz T.: *Biogazownie Rolnicze*. 2010.
- 29) Gołasa P.: *Potencjał do produkcji biogazu rolniczego w Polsce i jego aktualne wykorzystanie [w:] Ekonomiczne uwarunkowania produkcji bioenergii w gospodarstwach rolnych*, 2014.
- 30) Gołaszewski J.: *Wykorzystanie substratów pochodzenia rolniczego w biogazowniach w Polsce*. Postępy Nauk Rolniczych nr 2, 2011.
- 31) Gołębiowska M., Wróbel E.: *Wpływ nawożenia azotem na plonowanie kukurydzy*. Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin, 251, 121- 136. 2009.
- 32) Gorobets, O.V. Classification of agricultural waste and selection of their utilisation technology. Ecol. Sci., 4, 225–229. 2020.
- 33) Gostomczyk W.: *Stan i perspektywy rozwoju rynku biogazu w UE i Polsce – ujęcie ekonomiczne*. Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Warszawa 2017.
- 34) Gowin K.: *Rozwiązania technologiczne "uniwersalnej" biogazowni*. Czysta Energia, nr 3, 2017.
- 35) Jędrejek A., Jarosz Z.: *Regionalne możliwości produkcji biogazu rolniczego*. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – PIB w Puławach, Puławy 2015.
- 36) Johansen, A.; Nielsen, H.B.; Hansen, C.M.; Andreasen, C.; Carlsgart, J.; Hauggard-Nielsen, H.; Roepstorff, A. *Survival of weed seeds and animal parasites as affected by anaerobic digestion at meso-and thermophilic conditions*. Waste Manag., 33, 807–812. 2013.
- 37) Jönsson O., Persson M.: *Biogas as transportation fuel*. Swedish Gas Centre, 2003a.
- 38) Jönsson O.: *Biogas upgrading and use as transport fuel*. Swedish Gas Centre, 2003b.

- 39) Kaltschmitt M., Hartmann H.: *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2001.
- 40) Kamiński E., Markiewicz W., *Technika nawożenia nawozami naturalnymi*. ITP. Falenty, Kłudzienko. 2014.
- 41) Kazimierczak R., Hallmann E., Sokołowska O., Rembiałkowska E. *Zawartość związków bioaktywnych w roślinach zielarskich z uprawy ekologicznej i konwencjonalnej*. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 56, 3, 200-205. 2011.
- 42) Klemba K.: *Ekonomiczne i ekologiczne aspekty odsiarczania biogazu*. Praca inżynierska, IChOiE, PŁ, Łódź 2015.
- 43) Klimczak B.: *OZE ma coraz większą moc*. Biomasa, kwiecień 2020.
- 44) Kocoń A., *Nawozy naturalne i organiczne – współczesne zasady stosowania*. IUNG PIB Puławy. 2012.
- 45) KOG <https://www.kogeneracjaces.pl/download/file/publish/2016/11/kogeneracja-na-biogaz-i-osprzet-instalacji-biogazowych-2016.pdf> (data wejścia 5.01.2021 r.)
- 46) Kolář, L.; Kužel, S.; Peterka, J.; Borová-Batt, J. *Agrochemical value of the liquid phase of wastes from fermentem during biogas production*. Plant Soil Environ., 56, 23–27, 2012
- 47) Kośmider J., Mazur-Chrzanowska B., Wyszyński B.: *Odory*. PWN, Warszawa 2002.
- 48) Koszel, M.; Lorencowicz, E. *Agricultural use of biogas digestate as a replacement fertilizers*. Agric. Agric. Sci. Procedia, 7, 119–124. 2015
- 49) Kowalczyk-Juśko A. *Biogazownie szansą dla rolnictwa i środowiska*, FDPA, Warszawa 2013.
- 50) Kowalczyk-Juśko A., Szymańska M., *Poferment nawozem dla rolnictwa*. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa, Warszawa. 2015.
- 51) Kowalski Ł., Smerkowska B.: *A Polish case study for biogas to biomethane upgrading*. Combustion Engines nr 1, 2012.
- 52) KOWR <https://bip.kowr.gov.pl/informacje-publiczne/odnawialne-zrodla-energii/biogaz-rolniczy/dane-dotyczace-dzialalnosci-wytworcow-biogazu-rolniczego-w-latach-2011-2019> (data wejścia 21.12.2020 r.)
- 53) Kratzeisen, M.; Starcevic, N.; Martinov, M.; Maurer, C.; Müller, J. *Applicability of biogas digestate as solid fuel*. Fuel, 89, 2544–2548. 2010
- 54) Krawiec F.: *Odnawialne źródła energii w świetle globalnego kryzysu energetycznego*. Wybrane problemy. Warszawa, Difin 2010.

- 55) Książak J., Bojarszczuk J., Staniak M.: *Produkcyjność kukurydzy i sorga w zależności od poziomu nawożenia azotem*. Polish Journal of Agronomy, 8, 20–28. 2012.
- 56) Kujawski O.: *Przegląd technologii produkcji biogazu cz. I*. Czysta energia nr 12, 2009.
- 57) Łabętowicz J., *Opracowanie planu nawowego w gospodarstwie rolniczym*. Chemia rolna. Podstawy teoretyczne i praktyczne, SGGW, Warszawa, 264-279. 2002.
- 58) Łagocka A., Kamiński M., Cholewiński M., *Biogas fermentation by-products – the utilization as a full-value fertilizer and its impact on the rural areas*. II Int. Conf. Human Ecology. Wyd. Uczel. Zachodniopom. Uniw. Technol. W Szczecinie, 124-125. 2016.
- 59) Łagocka A., Kamiński M., Cholewiński M., Pospolita W., *Korzyści ekologiczne ze stosowania pofermentu z biogazowni rolniczych jako nawozu organicznego*. Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych, Tom 65, nr 4, 601-607. 2016a.
- 60) Lehtomäki A.: *Biogas production from energy crops and crop residues*. Jyväskylä University Printing House, 2006.
- 61) Lijó, L.; González-García, S.; Bacenetti, J.; Negri, M.; Fiala, M.; Feijoo, G.; Moreira, M.T. *Environmental assessment of farm-scaled anaerobic co-digestion for bioenergy production*. Waste Manag., 41, 50–59. 2015
- 62) Linke B.: *Biogas plants in Germany – experiences in implementation and processing*. Materiały konf. „Bioenergia w rolnictwie ze szczególnym uwzględnieniem biogazu”, Poznań 2009.
- 63) Lukehurst, C.T.; Frost, P.; Al Seadi, T. *Utilisation of digestate from biogas plants as biofertiliser*. IEA Bioenergy, 1–36. 2010.
- 64) Maczyszyn B.: *Biogazownie rolnicze pod klucz [w:] Małe Biogazownie rolnicze - mini poradnik*, Warszawa 2010.
- 65) Madlener R., Kowalski K., Stagl S.: *New ways for the integrated appraisal of national energy scenarios: The case of renewable energy use in Austria*. Energy Policy, Nr 12, 2007.
- 66) Makadi, M.; Tomocsik, A.; Eichler-Loebermann, B.; Schiemenz, K. *Nutrient cycling by using residues of bioenergy production-effects of biogas-digestate on plant and soil parameters*. Cereal Res. Commun., 36, 1807–1810. 2008
- 67) Makádi, M.; Tomócsik, A.; Orosz, V. *Digestate: A new nutrient source–review*. Biogas, 14, 295–312. 2012

- 68) Manahan S.: *Toksykologia środowiska. Aspekty chemiczne i biochemiczne*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
- 69) Michalski T.: *Biogazownia w każdej gminie – czy wystarczy surowca*. Wieś Jutra 3, Poznań 2009.
- 70) MIESZ1 <http://www.biogazownie.pl/fermentacja-metanowa.html> (data wejścia 5.01.2021 r.)
- 71) MIESZ2 <http://www.stallkamp.pl/biogaz/> (data wejścia 5.01.2021 r.)
- 72) Möller, K.; Müller, T. *Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review*. Eng. Life Sci., 12, 242–257. 2012,
- 73) MSR <https://www.suma.de/cs/pl/mieszadla/mieszadla-pretowe> (data wejścia 5.10.2021 r.)
- 74) MSZYB <http://www.grupakn.pl/products/21/mieszadla-do-komor-fermentacyjnych-i-biogazowni-westech> (data wejścia 7.11.2021 r.)
- 75) MWOL <https://techtrade.pl/mieszadla/> (data wejścia 7.11.2021 r.)
- 76) Myczko A.: *Budowa i eksploatacja biogazowni rolniczych. Poradnik dla inwestorów zainteresowanych budową biogazowni rolniczych*. Falenty: Wydawnictwo Instytutu Technologiczno—Przyrodniczego 2011.
- 77) Mystkowski E.: *Odnawialne źródła energii w województwie podlaskim*, Podlaski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Szepietowie, Szepietowo 2016.
- 78) Nikiciuk N.: *Potencjał ekologiczny i pro wzrostowy sektora biogazowni rolniczych w województwie podlaskim*. 2017.
- 79) PHYD <https://megabelzyce.pl/pl/produkt/biogazownia> (data wejścia 5.01.2021 r.)
- 80) Piskowska-Wasiak J.: *Uzdatnianie biogazu do parametrów gazu wysokometanowego*. Nafta-Gaz nr 2 (70), 2014.
- 81) Pomykała R., Łyko P.: *Biogaz z odpadów biopaliwem dla transportu -bariery i perspektywy*. Chemik nr 5, 2013.
- 82) Przesmycka A., Podstawka M.: *Ekonomiczna efektywność inwestycji w biogazownie rolnicze*. Stowarzyszenie Ekonomistów Rolnictwa I Agrobiznesu. Roczniki Naukowe, tom XVIII, zeszyt 6, 2016.
- 83) PSLIM <https://wamgroup.pl/pl-PL/WAMPL/Family/361/Przenosniki-i-Podajniki-Slimakowe> (data wejścia 5.01.2021 r.)
- 84) PWIR <https://pumps.netzsch.com/pl/zastosowanie-i-obszary-zastosowania/biogaz-rolnictwo/> (data wejścia 5.01.2021 r.)

- 85) PWYP <https://www.instalator.pl/2017/12/biogazownia-dostarczanie-paliwa/3/> (data wejścia 5.01.2021 r.)
- 86) Rembiałkowska E., *Żywnienie i żywność ekologiczna*. Wiad. Zielar. 42, 5, 6-8. 2000.
- 87) Romaniuk W., Biskupska K.: *Rozwiązania instalacji biogazowych dla gospodarstw rodzinnych*. Problemy Inżynierii Rolniczej (IV–VI): z. 2 (76) 2012.
- 88) Romaniuk W., Borusiewicz A., Domasiewicz T., Borek K., Marczuk T.: *Analiza potrzeb techniczno-technologicznych oraz propozycje w produkcji biogazu w produkcji biogazu w gospodarstwach rodzinnych i farmerskich*. Wydawnictwo WSA w Łomży, Łomża 2017.
- 89) Rozporządzenie 1997. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej z dnia 7 października 1997 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle rolnicze i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 132, poz. 877 z późniejszymi zmianami).
- 90) Rozporządzenie 2002. Rozporządzenie (WE) nr 1774/2002 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 3 października 2002 r. ustanawiające przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi.
- 91) Rozporządzenie 2008. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 16 kwietnia 2008 r. w sprawie szczegółowego sposobu stosowania nawozów oraz prowadzenia szkoleń z zakresu ich stosowania. Dz. U. Nr 80 poz. 479.
- 92) Rozporządzenie 2019. Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych (Dz.U. 2019 poz. 1311).
- 93) Rutkowski J.: *Technologia uprawy kukurydzy – od siewu do zbioru*. Warmińsko-Mazurski Ośrodek Doradztwa Rolniczego z siedzibą w Olsztynie. Olsztyn 2018.
- 94) Saaty T. L., Vargas L. G., Dellmann K.L.: *The allocation of intangible resources: The analytic hierarchy process and linear programming*. Socioecon. Plann. Sci., Nr 37, 2003.
- 95) Sahlström, L. *A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants*. Bioresour. Technol. 87, 161–166. 2003
- 96) San Cristobal J. R.: *Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method*. Renew. Energy, Nr 36, 2011.

- 97) Sassi, H.P.; Ikner, L.A.; Abd-Elmaksoud, S.; Gerba, C.P.; Pepper, I.L. *Comparative survival of viruses during thermophilic and mesophilic anaerobic digestion*. Sci. Total Environ. 615, 15–19. 2018.
- 98) Scholwin F., Gattermann H., Schattauer A., Weiland P.: *Biogas. Produktion, Verwendung* Institut für Energetik und Umwelt gGmbH 2008.
- 99) Singh A., Pandey J., *Metal contamination and health risk from consumption of organically grown vegetables influenced by atmospheric deposition in a seasonally dry tropical region of India*. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 89, 384-389. 2012.
- 100) Sklyar, A.; Sklyar, R. *Directions for the Use of Organic Resources in Stock-Raising*; Tavria State Agrotechnological University: Oblast, Ukraine, Volume 11, 2011.
- 101) Sogn, T.A.; Dragicevic, I.; Linjordet, R.; Krogstad, T.; Eijsink, V.G.; Eich-Greatorex, S. *Recycling of biogas digestates in plant production: NPK fertilizer value and risk of leaching*. Int. J. Recycl. Org. Waste Agric., 7, 49–58. 2018
- 102) Sołtysiak D.: *Prawne uwarunkowania wykorzystania masy pofermentacyjnej*. Mat. konf. II Seminarium międzynarodowego BIOGAZ 2010, Warszawa 2010.
- 103) Stanisław A.: *Przystępny kurs statystyki*. T. 1. Statsoft Polska, Kraków 1998.
- 104) Stegenta-Dąbrowska, S.; Sobieraj, K.; Koziel, J.A.; Bieniek, J.; Białowiec, A.: *Kinetics of Biotic and Abiotic CO Production during the Initial Phase of Biowaste Composting*. Energies 2020, 13, 5451.
- 105) Stetkiewicz J.: *Siarkowodór*. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2011.
- 106) Stoltmann A., Bućko P.: *Analiza lokalizacji biogazowni metodami Analizy Hierarchy Process (AHP) i taksonomii numerycznej –porównanie metod*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 53. 2017.
- 107) Szlęk M.: *Światowe trendy analityczne w oznaczaniu składników śladowych zawartych w biogazie*. Nafta-Gaz, 11(68) 2012.
- 108) Szynkowska M., Wojciechowska E., Węglińska A., Paryczak T.: *Odory. Aktualny problem w ochronie środowiska*. Przemiany Chemiczne 88(6) 2009.
- 109) Szynkowska M.I., Zwoździak J.: *Współczesna problematyka odorów*. WNT, Warszawa 2010.
- 110) Teglia, C.; Tremier, A.; Martel, J.-L. *Characterization of solid digestates: Part 1, review of existing indicators to assess solid digestates agricultural use*. Waste Biomass Valorization, 2, 43–58. 2011
- 111) TPO <http://www.biogastechnology.pl/aktualnosci/dozowanie-substratow-w-biogazowniach/> (data wejścia 5.01.2021 r.)

- 112) Tsachidou, B.; Scheuren, M.; Gennen, J.; Debbaut, V.; Toussaint, B.; Hissler, C.; George, I.; Delfosse, P. *Biogas residues in substitution for chemical fertilizers: A comparative study on a grassland in the Walloon Region*. *Sci. Total Environ.*, 666, 212–225. 2019
- 113) Ustawa 2001. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 roku o odpadach (Dz.U. 2001 nr 62 poz. 628 z późniejszymi zmianami).
- 114) Ustawa 2007. Ustawa z dnia 10 lipca 2007 roku o nawozach i nawożeniu (Dz.U. 2007 nr 147 poz. 1033 z późniejszymi zmianami).
- 115) Ustawa 2015. Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. 2015 poz. 478 z późniejszymi zmianami).
- 116) Wałowski G, Borek K., Romaniuk W., Wardal W. J., Borusiewicz A.: *Nowoczesne systemy pozyskania energii – biogazu*. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Oddział Warszawa Zakład Systemów Infrastruktury Technicznej Wsi, Warszawa 2019.
- 117) Wardal W. J.: *Problemy pozyskiwania biogazu rolniczego*. Falenty. Wydawnictwo ITP, 2014.
- 118) Warzecha R.: *Odmiany kukurydzy na ziarno, kiszonkę i biogaz*. [w:] Materiały konferencyjne „Kukurydza – nowe rozwiązania w uprawie” Doroszewski P. (red) Kujawsko-Pomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Minikowie, 16-20. Minikowo 2022.
- 119) Wellinger A., Baserga U., Edelman W., Egger K., Seiler, B.: *Biogas - Handbuch, Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen*. Verlag Wirz – Aarau, 1991.
- 120) Wiśniewski G., Oniszk-Popławska A., Sulima P.: *Kierunki rozwoju technologii biogazu rolniczego w UE i Polsce*. EC BREC Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2008.
- 121) Yurchenko, V.; *Safe Neutralization of Organic Waste as an Important Prerequisite to the Environmental Stabilization of Poultry Enterprises Territories*. Poltava State Agrarian Academy. 2018.
- 122) Żarczyński A., Rosiak K., Anielak P., Wolf W.: *Praktyczne metody oczyszczania biogazu z siarkowodoru. Cz. 1. Zastosowanie sorbentów stałych*. *Acta Innovations*, 12, 2014.
- 123) Żelezik M., *Dlaczego rolnictwo ekologiczne*. *Rocznik Świętokrzyski. Ser. B, Nauki Przyr.* Kielce 30, 155-166. 2009.
- 124) ZGD <http://www.zickert.pl/zgarniacz-denny-z2000.html> (data wejścia 5.01.2021 r.)

- 125) Zhou, L.; Hülsemann, B.; Merkle, W.; Guo, J.; Dong, R.; Piepho, H.-P.; Gerhards, R.; Müller, J.; Oechsner, H. *Influence of Anaerobic Digestion Processes on the Germination of Weed Seeds*. *Gesunde Pflanz.*, 72, 181–194. 2020.
- 126) Zieleniewicz W., Swędrzyńska D., Swędrzyński A.: *Wpływ stosowania zróżnicowanych dawek azotu na właściwości morfologiczne kukurydzy uprawianej na kiszonkę*. *Łąkarstwo w Polsce (Grassland Science in Poland)*, 21, 177-190. Poznań 2018
- 127) Żmuda, K. *Energetyka odnawialna w polityce Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi*. Bydgoszcz 2009.