

Określenie potencjału biogazowego masy odpadowej z przetwórstwa skór

Streszczenie. Odpady poprodukcyjne z przemysłu garbarskiego, można wykorzystać w inny sposób niż unieszkodliwianie konwencjonalne. Zamiast gromadzenia na składowiskach dużej ilości potencjalnego nośnika energii, można użyć go jako wśadu (kosubstratu) do biogazowni. Celem pracy było określenie ilości oraz składu chemicznego biogazu wytworzonego z odpadów z przemysłu garbarskiego. Wśad pozyskany z firmy przetwarzającej oraz obrabiającej skóry zwierzęce. Przygotowany wśad został umieszczony w fermentorze badawczym na okres 30 dni. Wyniki badań dowodzą możliwość fermentacji wśadu składającego się ze ścinków skór zwierzęcych, tłuszczu, włosia oraz wykazują wysoki uzysk metanu przy normalnej ilości dwutlenku węgla oraz tlenu.

Abstract. Production waste can be used in a different way than landfill. Instead of collecting a large amount of potential energy carrier you can use it as feedstock for the biogas plant. The aim of the study was to determine the amount and chemical composition of biogas produced from waste from the tanning industry. The batch obtained from business processing of the animal skins was placed in a fermenter for the test period of 30 days. The test results demonstrate the possibility of the fermentation a scrap of animal skins, fat, bristles and a high methane yield with normal carbon dioxide and oxygen (**Analysis of biogas emitted from waste tanning industry**)

Słowa kluczowe: Fermentacja metanowa, biogaz, odpady garbarskie
Keywords Methane fermentation, biogas, tanning waste

Wstęp

Ochrona środowiska przyrodniczego jest głównym celem wielu spotkań, wykładów czy konferencji. Narastające zanieczyszczenie powietrza w całej Polsce, jest powodem powstania różnych problemów, chorób i motywacją a nawet koniecznością do wprowadzenia innowacyjnych rozwiązań które pomogą dbać o środowisko i jakość powietrza którym oddychamy. Zastosowanie odnawialnych źródeł energii, do wytwarzania energii elektrycznej czy np. ciepłej wody użytkowej przy użyciu rozwiązań dużo mniej inwazyjnych dla środowiska niż tradycyjne już przestarzałe piece węglowe i inne paleniska produkujące ogromną ilość zanieczyszczeń. Oprócz kolektorów słonecznych, ogniw fotowoltaicznych albo wiatraków jednym z źródeł energii odnawialnej są biogazownie a konkretnie produkowany w nich biogaz [1].

Biogaz jest mieszaniną gazów powstających w procesie biologicznym, występującym zarówno naturalnie jak i przy pomocy człowieka. w przyrodzie mamy z nim do czynienia np. w żwaczach przeżuwaczy, na dnie mórz czy na torfowiskach, natomiast człowiek może wyprodukować go w biogazowniach, które są potocznie zwanymi betonowymi krowami ze względu na zasadę działania która jest zbliżona do tej występującej u zwierząt [2].

Proces fermentacji odbywa się w środowisku beztlenowym, przy odpowiedniej temperaturze i przy określonej wilgotności, taki gaz składa się głównie z metanu i dwutlenku węgla w proporcjach około dwóch do jednego. Oprócz tego znajdują się śladowe ilości innych związków takich jak siarkowodor, amoniak czy wodór które również powstają w procesie produkcji natomiast są traktowane jako zanieczyszczenia czy substancję niepożądaną [3].

Biogaz zanim zostanie wykorzystany jako paliwo do generatorów produkujących energię elektryczną, musi zostać oczyszczony. Zawartość siarkowodoru mogła by doprowadzić do korozji silnika co niosło by za sobą wielkie konsekwencje zarówno związane z przestojem biogazowni jak i z dużymi stratami finansowymi, dlatego oczyszczanie biogazu jest niezbędnym i bardzo ważnym etapem produkcji [3,4,5].

Przemysł garbarski z którego powstają odpady organiczne jest niczym innym jak produkcją skór, które później się wykorzystuje przy produkcji odzieży, akcesoriów czy innych skórzanych rzeczy, które często są synonimem zamożności czy produktów o wysokiej jakości. Jest to proces złożony, składający się z wielu etapów od początkowego zdjęcia skóry po uzyskanie gotowego produktu, lecz na samym początku kiedy skóra już jest oddzielona odbywa się jej moczenie a następnie skrawanie i ścinanie mające na celu usunięcie warstwy mięsnej oraz zanieczyszczeń z powierzchni skóry. Musi to mieć miejsce przed obróbką chemiczną, gdyby zostały zastosowane chemikalia, taki odpad nieprzydatny w biogazowni ponieważ zaburzyło by to cały proces fermentacyjny. Każdy wśad do biogazowni musi być wolny od niepożądanych związków chemicznych, które mogły by prowadzić do zatrzymania procesu fermentacji.

Garbowanie jest niezbędnym procesem aby zabezpieczyć skórę surową przed degradacją mikrobiologiczną oraz działaniem wilgoci i ciepła. Technologia garbowania składa się z szeregu etapów technologicznych. Skóra jest poddawana w pierwszej kolejności procesom tzw. Warsztatu mokrego, których celem jest usunięcie naskórka, włosia, zbędnych tkanek oraz nawodnienie skóry. W następnej kolejności skórę poddaje się właściwemu procesowi garbowania, który polega na wiązaniu cząstek garbnika z kolagenem skóry. Najczęściej używa się do tego sole chromu (III). Wygarbowane skóry wykańcza się nadając im odpowiedni wygląd oraz właściwości.

Wszystkie z tych operacji generują znaczne ilości odpadów, z przetworzenia 1Mg skór surowych wytwarza się około 200 kg użytecznego produktu, reszta jest odpadem poprodukcyjnym. Składają się na niego odpady skór niegarbowanych (odzierki, cyplowiny skór surowych), odpady skór garbowanych (cyplowiny skór garbowanych, pył skórzany) oraz osady z oczyszczalni ścieków. Kolejnym problemem dla środowiska jest zużycie wody w procesach garbarskich, na 1 Mg przetwarzanych skór zużywa się około 50 m³ wody [6].

Możliwość wytwarzania biogazu pod względem wsadu uzyskanego z biomasy lub różnego rodzaju odpadów rolniczych albo spożywczych jest bardzo szeroka. Wszystkie gospodarstwa rolne lub duże gospodarstwa hodowlane produkują odpady, jedne produkują ich mniej inne więcej ale zawsze odpad leżący i gnijący oprócz nie wykorzystanych walorów względu energetycznego fermentują, a powstały w tym procesie biogaz unosi się do atmosfery przyczyniając się do nasilania się efektu cieplarnianego.

Zarówno odpady zielone powstałe w gospodarstwach rolniczych jak i gnojowica czy obornik w przypadku gospodarstw hodowlanych fermentują w taki sam sposób. Biogaz powstający w sposób niekontrolowany oprócz szkód środowiskowych może prowadzić do pożarów czy nie przyjemnego zapachu w całej okolicy gospodarstwa [7].

W Polsce ze względu na występowanie głównie biogazowni rolniczych gdzie wsadem fermentacyjnym są surowce z pochodzenia rolniczego lub produkty uboczne materii organicznej najczęściej zastosowane są metody jedno lub dwu etapowe.

Jednostopniowa fermentacja polega na prowadzeniu procesu w jednej komorze i jest częściej stosowana ze względu na niższy koszt budowy i utrzymania jednego reaktora, dwustopniowy proces różni się ilością reaktorów, w tym przypadku występują dwa. Stworzenie warunków do rozwoju mikroorganizmów w obu fazach procesu powoduje wzrost rozkładu substancji organicznych do nawet 80% i bardziej stabilną produkcję biogazu i skrócenie czasu trwania fermentacji do około 5 dni [8]. Natomiast oprócz korzyści wynikających z bardziej zaawansowanego procesu i bardziej efektywnego uzysku biogazu znaczącym warunkiem jest wyższy koszt zastosowania takiego rozwiązania.

Podziału fermentacji ze względu na temperaturę procesu można wyszczególnić jako biogazownie mezofilowe oraz termofilowe. Biogazownie z fermentacją mezofilową utrzymują temperaturę procesu w przedziale od 32 do 38°C, natomiast biogazownie termofitowe w zakresie od 42 do 55°C, należy zaznaczyć iż te granice nie są stałe. Większość biogazowni bo aż około 85% jest opartych na procesie mezofilowym [2].

Tryb napełniania fermentora wynika głównie z dostępności substratu i konstrukcji instalacji. Sezonowość substratu, który jest wykorzystywany w instalacji może mieć duży wpływ na tryb napełniania fermentora.

Napełnianie nieciągłe w tym trybie zbiornik fermentacyjny jest zapełniany świeżym substratem i hermetycznie zamykany. Wsad pozostaje w zbiorniku przez określony czas i w tym okresie nie jest uzupełniany innym substratem. Po upływie czasu fermentacyjnego komora zostaje opróżniona, pozostawia się jedynie niewielką ilość ze starego wsadu w celu zaszczepienia nowego procesu dla kolejnego cyklu załadowania świeżej masy i zbiornik znowu jest szczelnie zamykany. Ta metoda nie pozostaje bez minusów, główną wadą jest zmiana ilości i jakości produkowanego biogazu wraz z upływem czasu [8]. Napełnianie częściowo ciągłe. Jego główną cechą charakterystyczną jest napełnienie zbiornika fermentora przynajmniej jeden raz w ciągu doby, uzupełnianie komory przyczynia się do zwiększenia równomierności pozyskiwania biogazu, jego jakość jest zbliżona w skali okresu czasu oraz użycie tej metody pozwala na zagospodarowanie wsadu od razu po jego powstaniu. Ma to spore znaczenie przy wykorzystywaniu wsadu który jest trudny w przechowywaniu na dłuższy okres czasu [3].

Napełnianie ciągłe, jest to najlepszy sposób napełniania zbiornika fermentacyjnego ze względu na równomierność

produkowanego gazu i bardzo dobre wykorzystanie pojemności fermentora. Charakteryzują się wielokrotnym napełnianiem zbiornika w ciągu doby i wybieraniem takiej samej ilości odpadów pofermentacyjnych do zbiornika składowego. Zbiornik fermentacyjny cały czas jest zapełniony wsadem o podobnych parametrach a jego pojemność jest wykorzystywana cały czas w bardzo podobnym stopniu. W tym wariacie bardzo ważną rolę odgrywa system mieszalniczy aby uniknąć zrzucenia do zbiornika składowego świeżo dodanego wsadu który nie został dostatecznie rozmieszany [9].

Zawartość substancji suchej w substratach fermentacyjnych

W biogazowniach rolniczych dominuje zastosowany proces fermentacji mokrej ze względu na gazowanie głównie substratów pompowalnych, proces fermentacji suchej jest wykorzystywany głównie w biogazowniach doświadczalnych.

Przy fermentacji mokrej substratów z możliwością przepompowywania stosowane są metody :

- metody przepływu tłokowego,
- metody przepływu pełnego (z idealnym mieszaniem),
- metody specjalne.

Celem pracy było określenie ilości oraz jakości wydzielanego biogazu uzyskanego z odpadów garbarskich podczas fermentacji metanowej, statycznej w fermentorach laboratoryjnych o objętości 2 dm³. Czas retencji został przyjęty na poziomie 30 dni. Wyznaczenie składu biogazu pod względem ilości metanu, dwutlenku węgla oraz tlenu wyznaczono za pomocą miernika wielogazowego NANOSENS 60. Ilość biogazu określano na podstawie zbiornika o zmiennej objętości.

Materiały i metodyka badań

Badanym materiałem były odpady garbarskie przed obróbką chemiczną, zastosowanie środków chemicznych wykluczyłoby go z użycia jako wsad fermentacyjny. Zostały one pozyskane z firmy zajmującej się obróbką skór zwierzęcych. Wilgotność odpadu wynosiła 44,56%. Wsad składał się głównie ze ścinków skór, ściętego włosa zwierzęcego oraz tłuszczu co czyniło go materiałem o wysokiej kaloryczności energetycznej i dużym potencjale jako substrat do fermentacji metanowej..

Pozyskana masa została rozdrobiona i pobrano próbki do określenia suchej masy. Do suszenia wykorzystano konwekcyjną suszarkę laboratoryjną z wymuszonym obiegiem powietrza Elkon 110. Obliczenie suchej masy zostało wyznaczone na podstawie zależności 1.

$$(1) u = \left(\frac{mp - mk}{mp} \right) \times 100\%$$

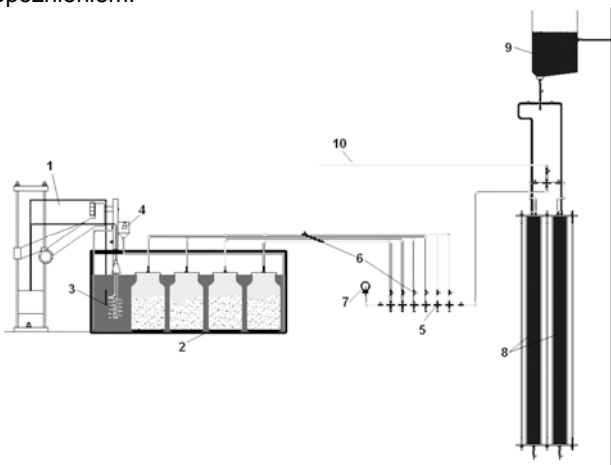
u - wilgotność wagowa [%], m_p - masa początkowa [g], m_k - masa końcowa [g].

Masa końcowa suszonego materiału stanowi zawartość suchej masy w badanej próbce.

Kolejna próbka takiego samego materiału została umieszczona w piecu laboratoryjnym w celu określenia zawartości frakcji mineralnych w materiale. Po procesie materiał, który pozostał w tygielku jest frakcją mineralną, natomiast utrata masy określa ilość suchej masy organicznej którą można podać fermentacji.

Materiał został uwodniony i umieszczony w fermentarach o objętości 2 dm³ z dodatkiem inoculum pozyskanego z podłoża biogazowni rolniczej a następnie pojemnik został szczelnie zamknięty oraz umieszczony w komorze o regulowanej atmosferze temperaturowej. Intensywność wydzielanego biogazu została przeprowadzona zgodnie z normą DIN 38414 [10]. Wsady

fermentowane były w warunkach statycznych, czyli jednorazowym umieszczeniu wsadu do komory fermentacyjnej i prowadzeniu fermentacji aż do jej zakończenia. Fermentory zostały umieszczone w zbiorniku z regulowaną temperaturą który był częścią stanowiska badawczego składającego się dodatkowo z tablicy rozdzielczej oraz układu pomiarowego. Schemat stanowiska został przedstawiony na rysunku 1. Do stelaża (1) obok którego znajdował się zbiornik (2) przymocowane były urządzenia utrzymujące stałą temperaturę. Sterowane było one przy pomocy termostatu elektronicznego ESCO ES-20 (stycznik 16A) z dokładnością do $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ wynikającą z histerezy czujnika. Spadek temperatury przekraczający $0,1^{\circ}\text{C}$ powodował włączenie grzałki (3) z jednoczesnym uruchomieniem pompy Hanning DPO 25-205 (4) dzięki czemu możliwy był równomierny rozkład temperatury w całej komorze. Po podgrzaniu wody do przekroczenia zadanej temperatury grzałka zostawała wyłączona oraz pompa zostawała wyłączona z 30-sto sekundowym opóźnieniem.



Rys. 1 Schemat stanowiska badawczego z fermentorami 2 dm³
Źródło:[5]

Połączone szeregowo rozdzielacze z zaworami odcinającymi (6) i manometrem (7) który mierzył ciśnienie w poszczególnych gałęziach pomiarowych stanowiły tablicę rozdzielczą (5). Układ pomiaru objętości (8) składał się z dwóch kolumn wypełnionych wodą i zaworami spustowymi oraz zbiornikiem do uzupełniania cieczy w kolumnach (9). Tablica rozdzielcza została połączona z układem pomiarowym oraz miernikiem składu biogazu za pomocą przewodu (10).

Wyniki badań

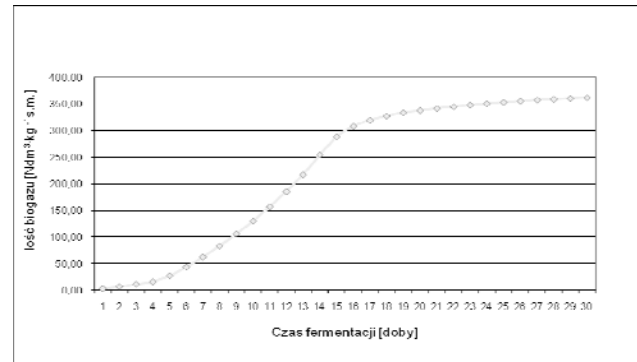
Po określeniu suchej masy i suchej masy organicznej w przyjętej frakcji do badan (tabela 1), na tej podstawie skomponowano podłoże fermentacyjne do fermentora o optymalnej zawartości suchej masy w złożu. Przyjęte odpady charakteryzowały się wilgotnością na poziomie 44,56%. Zawartość popiołu w badanej próbce wynosiła 11,24%, a sucha masa organiczna była na poziomie 88,76%. W procesie fermentacji metanowej bierze udział tylko sucha masa organiczna natomiast frakcja mineralna jest balastem w komorze fermentacyjnej nadmiar frakcji mineralnej może stać się inhibitorem procesu fermentacji metanowej.

Na podstawie przeprowadzonych badań fermentacji metanowej odpadów garbarskich, można wywnioskować, iż największy sumaryczny uzysk biogazu miał miejsce od piątej doby do około piętnastej (rysunek 1). Podczas pierwszych czterech dni fermentacji oraz po dwudziestym trzecim dniu sumaryczny uzysk biogazu w stosunku do

reszty dni był niewielki. Największy uzysk biogazu przypada na czternasty dzień fermentacji. Przez cały okres badania stosunek metanu, dwutlenku węgla oraz tlenu był bardzo podobny.

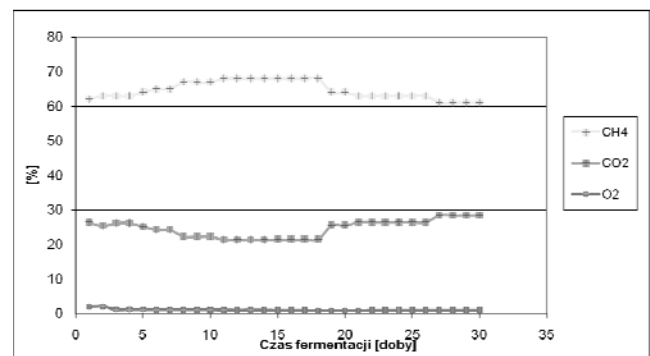
Tabela 1. Właściwości badanej próbki

	Sucha masa [g]	Masa wsadu [g]	Wilgotność próbki [%]	Sucha masa organiczna [%]	Frakcja mineralna [%]
Odpady z przemysłu garbarskiego	200	361	44,56	88,76	11,24



Rys. 2 Biogazodochodowość wsadu

Na rysunku 2 przedstawiono procentowy skład biogazu w poszczególnych dniach 30-dniowej fermentacji metanowej. Zarówno metan jak i dwutlenek węgla podczas całego procesu był wytwarzany w podobnych ilościach. W przypadku metanu wynik utrzymywał się na poziomie przekraczającym 60%, dwutlenek węgla utrzymywał się w granicach 20-30%. Wytwarzany tlen przez pierwsze dni był wytwarzany w nieco większej ilości niż przez pozostałe dni, natomiast bardzo mała rozbieżność wyników może świadczyć o dostaniu się tego tlenu w trakcie zamykania komory fermentacyjnej i w kolejnych dniach ustabilizował się na poziomie około 1%.



Rys. 3. Skład wydzielanego biogazu

Na podstawie składu chemicznego i sumarycznego uzysku biogazu można wyznaczyć całkowitą energię cieplną skumulowaną w paliwie. Na tej podstawie można dobrać jednostkową moc kogeneratora. Z rysunku 2 wynika, że z 1 tony wsady wykonanego na bazie odpadów garbarskich, można uzyskać biogaz o objętości 360 Nm³ z jednego metra sześciennego biogazu jak wynika z rysunku 3, można uzyskać 6 kWh energii.

Moc nominalną generatora prądowłórczego wyznacza się na podstawie zależności 2.

Moc nominalna generatora prądowłórczego w układzie kogeneracyjnym:

$$(2) \quad E_{el} = \frac{E_{tot} \times \eta_{el}}{T_p} (kW)$$

gdzie: E_{tot} - całkowita energia cieplna zawarta w paliwie (kWh), η_{el} - sprawność przetwarzania energii elektrycznej (%), T_p - czas wprowadzania biogazu (h).

Całkowita energia cieplna zawarta w paliwie określona na podstawie zależności 3.

$$(3) \quad E_{tot} = V_{sub} \cdot Q_{bio} (kWh)$$

gdzie: V_{sub} - strumień objętości biogazu (m^3/d), Q_{bio} - wartość opałowa biogazu (kWh/m^3).

$$E_{tot} = 6 \cdot 360 = 2160 (kWh)$$

Na podstawie sumarycznego wydzielania biogazu, uzyskanego z badanej frakcji, można wyznaczyć jednostkową moc nominalną generatora prądowłórczego w układzie kogeneracyjnym, zgodnie z zależnością nr 2.

$$E_{el} = \frac{2160 \times 0,39}{24} = 35 (kW t^1 s.m.)$$

Badania miały na celu określenie możliwości fermentacji materiału jakim są odpady garbarskie, określenie składu oraz jakości biogazu na podstawie ilości metanu, dwutlenku węgla oraz tlenu. Wyniki przeprowadzonej fermentacji metanowej podłoża skomponowanego na bazie odpadów garbarskich udowadniają że wsad ten z powodzeniem może być wykorzystywany jako kosubstat w biogazowniach.

Proces fermentacji metanowej charakteryzował się opóźnieniem z inhibicją trwającym cztery pierwsze doby. Podczas całego 30-to dniowego okresu retencji wydzielany biogaz charakteryzował się zbliżonym składem chemicznym metan wydzieliał się na poziomie ponad 60%, oraz około 25% w przypadku dwutlenku węgla. Sumaryczny uzysk biogazu wynosił ponad $360 Ndm^3 \cdot kg^{-1} \cdot s.m$ co jest bardzo zadowalającym wynikiem i wyższym niż w przypadku fermentacji wsadu skomponowanego na bazie kiszonki z kukurydzy ($240 Ndm^3 \cdot kg^{-1} \cdot s.m$) [11].

Nioski końcowe

Badanie miało na celu określenie możliwości fermentacji materiału jakim są odpady garbarskie, określenie składu oraz jakości biogazu na podstawie ilości metanu, dwutlenku węgla oraz tlenu. Wyniki przeprowadzonej fermentacji metanowej podłoża skomponowanego na bazie odpadów garbarskich udowadniają że wsad ten z powodzeniem może być wykorzystywany jako kosubstat w biogazowniach.

Ilość wydzielonego biogazu z odpadów garbarskich spełnia wymagania związane z budową małej biogazowni, wedle kryteriów Agencji Rynku Rolnego Mała biogazownia to instalacja o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej większej niż 40 kW.

Z badanych odpadów można wytwarzać biogaz na cele energetyczne i prowadzić działalność związaną

z wytwarzaniem energii elektrycznej (produkcja biogazu na cele energetyczne), która może stanowić dywersyfikację dochodów przedsiębiorstwa zajmującego się przetwórstwem skór.

Na podstawie uzysku biogazu otrzymanego podczas trwania fermentacji badanych próbek skomponowanych na bazie odpadów garbarskich, jednostkowa moc zainstalowana generatora wynosi $35 kW^{-1} 1Mg s.m.$

Autorzy: dr inż. Jakub Sikora, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: jakub.sikora@ur.krakow.pl; dr inż. Krzysztof Nęcka, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: krzysztof.nECKA@ur.krakow.pl; dr hab. inż. Anna Szelag-Sikora, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: anna.szelag-sikora@ur.krakow.pl; dr hab. inż. Paweł KIEŁBASA, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, E-mail: Pawel.Kielbasa@urk.edu.pl; dr hab. inż. Jarosław Knaga, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: jaroslaw.knaga@ur.krakow.pl; dr inż. Maciej Gliniak, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków, E-mail: maciej.gliniak@urk.edu.pl; dr inż. Tomasz Szul, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: tomasz.szul@ur.krakow.pl; dr inż. Marek OSTAFIN, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Mikrobiologii, E-mail: mostafin@ar.krakow.pl;

LITERATURA

- [1] Lewandowski W. i in. (2013). Biopaliwa. Proekologiczne odnawialne źródła energii, Wydawnictwo WNT.
- [2] Schattauer A. i in. (2006). Biogaz – produkcja, wykorzystywanie, Institute für Energetik und Umwelt gGmbH.
- [3] Podkówa W. (2012). Biogaz rolniczy odnawialne źródło energii. Powszechnie Wydawnictwo Leśne, Warszawa.
- [4] Kurytnik I., Drózd T., Kuciński S.: „Badania zaburzeń elektromagnetycznych na przyłączach energetycznych odnawialnych źródeł energii”, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, NR 05/2014, STRONA 252-256.
- [5] Sikora J. (2012). Badanie efektywności produkcji biogazu z frakcji organicznej odpadów komunalnych zmieszanej z biomasą pochodzenia rolniczego, Polska Akademia Nauk.
- [6] Wieczorek-Ciurowa K., Famielec S., Fela K. (2011). Chemik. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego.
- [7] Romaniuk W., Domasiewicz T. (2014). Substraty dla biogazowni rolniczych, Wydawnictwo Hortpress Sp. z o.o.
- [8] Jędrzak A. (2007). Biologiczne przetwarzanie odpadów, PWN.
- [9] Kujawski O. (2009). Przegląd technologii do produkcji biogazu cz. I. Czysta energia
- [10] DIN 38414 S 8. Niemiecka znormalizowana metoda badań wody, ościeków i osadów. Osady i sedymenty (grupa S). Określenie charakterystyki fermentacji (S. 8). DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2012.
- [11] Sikora J., Tomal A. 2016. Wyznaczenie potencjału energetycznego biogazu w wybranym gospodarstwie rolnym. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Nr 2016/ III (2 (Jun 2016)).