

## Spis treści

<b>Wstęp</b> .....	7
<b>Maria Baranowska, Władysław Chojnowski, Hanna Nowak:</b> Dezynfekcja w zakładach mleczarskich .....	9
<b>Marta Ciecierska:</b> Ocena poziomu świadomości konsumentów w zakresie migracji niepożądanych substancji chemicznych do żywności z opakowań i materiałów będących w kontakcie z żywnością .....	23
<b>Aleksandra Gołoś, Dariusz Piotrowski, Piotr Grzegory, Mariusz Wojnowski:</b> Wpływ temperatury na strukturę i barwę truskawek suszonych wybranymi metodami .....	31
<b>Natalia Kordala, Małgorzata Lewandowska, Artur Kleina, Karolina Świątek:</b> Ocena właściwości celulozowych <i>Cellulosimicrobium cellulans</i> do biokonwersji polisacharydów słomy rzepakowej .....	43
<b>Tomasz Lesiów, Kamila Orzechowska-Przybyła, Alina Niewelt:</b> Rola przeglądów zarządzania w doskonaleniu jakości i bezpieczeństwa żywności, obsługi klienta oraz systemu zarządzania jakością w dwóch wybranych przedsiębiorstwach przemysłu żywnościowego .....	56
<b>Alicja Mańka, Karolina Kosatka, Klaudia Dąbrowska, Renata Stańczyk, Małgorzata Krzywonos:</b> Finansowy i ekonomiczny aspekt prowadzenia własnej winnicy .....	76
<b>Andrzej Okruszek, Teresa Skrabka-Blotnicka:</b> Automatyczne linie uboju bydła i trzody chlewnej.....	84
<b>Agnieszka Pilarska, Krzysztof Pilarski, Antoni Ryniecki:</b> Wykorzystanie fermentacji metanowej do zagospodarowania wybranych produktów odpadowych przemysłu spożywczego.....	100
<b>Karolina Świątek, Małgorzata Lewandowska, Andrzej Juszczuk, Natalia Kordala:</b> Otrzymywanie etanolu ze słomy rzepakowej w procesie symultanicznej hydrolizy i fermentacji w systemie półciąglym .....	112
<b>Maria Wachowska, Marek Adamczak:</b> Wpływ sposobu i czasu solenia oraz dojrzewania sera edamskiego na jego wybrane parametry jakościowe.....	126
<b>Tomasz Lesiów, Ewa Biazik, Andrzej Okruszek:</b> Sprawozdanie z VI Konferencji Naukowo-Technicznej z cyklu Nauka – Praktyce pt. „Zastosowanie nowatorskich rozwiązań technologicznych w przemyśle spożywczym” ...	137

## Summaries

<b>Maria Baranowska, Władysław Chojnowski, Hanna Nowak:</b> Disinfection in dairy plants .....	22
<b>Marta Ciecierska:</b> Evaluation of level of consumer awareness in migration of undesirable chemicals to food from food packaging and food contact materials.....	30
<b>Aleksandra Gołoś, Dariusz Piotrowski, Piotr Grzegory, Mariusz Wojnowski:</b> Influence of the temperature on the structure and color of strawberries dried by selected methods .....	42
<b>Natalia Kordala, Małgorzata Lewandowska, Artur Kleina, Karolina Świątek:</b> Evaluation of cellulolytic properties of microorganisms for bioconversion of food industry wastes .....	55
<b>Tomasz Lesiów, Kamila Orzechowska-Przybyła, Alina Niewelt:</b> The role of management reviews in the improvement of food quality and safety, customer service and quality management system in two selected enterprises of food industry .....	75
<b>Alicja Mańka, Karolina Kosatka, Klaudia Dąbrowska, Renata Stańczyk, Małgorzata Krzywonos:</b> Financial and economic aspect of running own vineyard .....	83
<b>Andrzej Okruszek, Teresa Skrabka-Blotnicka:</b> Automated commercial slaughter lines of pigs and cattle.....	99
<b>Agnieszka Pilarska, Krzysztof Pilarski, Antoni Ryniecki:</b> The use of methane fermentation in the development of selected waste products of food industry .....	111
<b>Karolina Świątek, Małgorzata Lewandowska, Andrzej Juszcuk, Natalia Kordala:</b> Obtaining of ethanol from rape straw in the process of simultaneous hydrolysis and fermentation in fed-batch system.....	125
<b>Maria Wachowska, Marek Adamczak:</b> Influence of the brine composition and time of Edam cheese salting and ripening on its selected quality parameters.....	136

**Agnieszka Pilarska, Krzysztof Pilarski, Antoni Ryniecki**

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

e-mail: pilarska@up.poznan.pl

---

## WYKORZYSTANIE FERMENTACJI METANOWEJ DO ZAGOSPODAROWANIA WYBRANYCH PRODUKTÓW ODPADOWYCH PRZEMYSŁU SPOŻYWCZEGO\*

---

**Streszczenie:** Zwiększenie ilości odpadów i zanieczyszczeń organicznych w ostatnich latach, związane m.in. ze zwiększeniem produkcji żywności, stanowi coraz większy problem. Biorąc pod uwagę konieczność ich unieszkodliwiania, a także naturalne pochodzenie i skład chemiczny, uznano, że najkorzystniejszymi i najbardziej ekonomicznymi sposobami degradacji są metody biotechnologiczne, w tym fermentacja metanowa. Przedstawione badania obejmowały wstępną analizę surowca (pH, konduktywność, suchą substancję i suchą substancję organiczną) oraz jego biodegradację na drodze fermentacji metanowej, przeprowadzoną w celu oszacowania ilości wytworzonego biogazu, w tym również metanu. W doświadczeniu wykorzystano wysłodki z jabłek, osad czynny z oczyszczalni, retentat (osad z filtracji owoców) oraz ziemiaki odpadowe. Największą ilość biogazu w przeliczeniu na tonę świeżej substancji otrzymano dla próbki zawierającej wysłodki z jabłek. Znaczące rezultaty uzyskano również w przypadku zastosowania ziemiaków odpadowych oraz retentatu, który – mimo niskiej zawartości suchej masy – pozwala na wysoki uzysk biogazu.

**Słowa kluczowe:** odpady z przemysłu spożywczego, inertyzacja odpadów, fermentacja metanowa, produkcja biogazu.

DOI: 10.15611/nit.2014.4.08

*Nie można przyrody zwyciężyć inaczej  
niż przez to, że się jej słucha.*

Francis Bacon

### 1. Wstęp

Fermentacja metanowa (*anaerobic digestion* – AD) jest biochemicznym procesem degradacji, szeroko stosowanym do pozyskiwania energii z różnego rodzaju biomasy w postaci produktów rolnych, odpadów rolno-przemysłowych, w tym także spo-

---

\* Pracę zrealizowano w ramach grantu badawczego NCN nr N N313 432539: „Ocena wartości nawozowej i wpływu na glebę pulpy pofermentacyjnej powstającej w procesie wytwarzania biogazu z wykorzystaniem różnych substratów organicznych”.

żywczych. Technologia ta oferuje korzystne możliwości szybkiego rozkładu substancji organicznych, produkcji biogazu i zaoszczędzenia energii pochodzącej z biopaliw kopalnych. Jej rozpowszechnianie w ostatnich latach jest jak najbardziej zgodne z zasadami ochrony środowiska i zasadami zrównoważonego rozwoju przyjętego przez państwa członkowskie UE. Głównym produktem fermentacji metanowej jest mieszanina gazu (biogaz), którego głównym składnikiem jest metan, stosowany jako paliwo do wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej. Produkt odpadowy procesu, tzw. pulpa pofermentacyjna, może być bezpośrednio wykorzystany do nawożenia gleby lub posłużyć jako wysokojakościowy materiał do przygotowania kompostu [Pilarski, Dach, Mioduszevska 2010]. Nawóz pofermentacyjny z biogazowni rolniczych charakteryzuje się wysoką zawartością zmineralizowanego azotu, fosforu i potasu oraz wysoką stabilnością. Ponadto jest wolny od pasożytów, chwastów, a także bakterii fekalnych.

Rozpatrując budowę biogazowni, należy rozpocząć od określenia rodzaju i ilości wsadu oraz sprecyzowania jego dostępności, tzn. czy będzie on dostarczony przez cały rok, czy okresowo. Dostępność substratów bardzo często decyduje o lokalizacji biogazowni [Pilarska i in. 2013]. Wyniki badań substratów, ich biogazodochodowość, mogą wskazać potrzebę modyfikacji technologii w kierunku opłacalności inwestycji. Największa możliwa ilość oraz rodzaj przebadanych substratów pozwala na ich właściwy dobór i w dużej mierze decyduje o sukcesie funkcjonowania biogazowni [Witaszek i in. 2013]. Ze względu na tak istotne czynniki, jak: zwiększona produkcja biogazu, regulacja pH i stabilizacja przebiegu procesu, a ponadto zawartość suchej masy, bilans składników pokarmowych, ograniczenie działania związków inhibitujących (m.in. amoniaku, produktów rozkładu tłuszczów), w większości przypadków realizowana jest tzw. beztlenowa kofermentacja z udziałem mieszaniny odpowiednich substratów [Bochdziewicz, Kuglarz, Mrowiec 2011; Kowalczyk-Juśko 2011].

Doniesienia literaturowe wskazują, że fermentacja metanowa owoców i warzyw bez jakiegokolwiek kosubstratu jest zadaniem trudnym ze względu na ich wysoką zawartość cukrów prostych, które często promują zakwaszenie biomasy, co w konsekwencji inhibituje działanie bakterii metanogennych [Scano i in. 2014]. W celu zahamowania niekorzystnego spadku pH i destabilizacji fermentacji beztlenowej odpadów owocowo-warzywnych (*Fruit and Vegetable Wastes* – FVWs) do mieszaniny dodawane są inne substraty, typu obornik czy osady ściekowe [Kafle, Kim 2013; Luostarnen, Luste, Sillanpää 2009]. Dodatek obornika zapewnia zdolność buforowania (z racji zasadowego odczynu) oraz wiąże składniki odżywcze, podczas gdy materiał roślinny zapewnia wysoką zawartość węgla, wynikiem czego jest zróżnicowany stosunek C/N oraz wydajna produkcja biogazu (odnotowuje się wzrost ilości wyprodukowanego biogazu z 18 do 48% w porównaniu z uzyskiem biogazu z materiału roślinnego). Samodzielna fermentacja osadu ściekowego generuje powstawanie dużych ilości lotnych kwasów tłuszczowych i z tego głównie powodu jest niekorzystna w rezultatach [Gomez i in. 2006]. Badania przeprowadzone w Finlan-

dii [Kymäläinen i in. 2012], gdzie około miliona ton osadów ściekowych stabilizowanych jest na drodze fermentacji beztlenowej, dowiodły jednak, że to właśnie biogaz pochodzący z fermentacji ścieków jest najbogatszy w metan (300-400 m<sup>3</sup>/tV), a najmniej w zanieczyszczenia typu: benzen, siarkowodór czy azot. Zastosowanie w charakterze kosubstratu jabłek, których zagospodarowanie w takich państwach, jak Korea czy Hiszpania bywa problematyczne, może być w tym przypadku korzystnym rozwiązaniem [Coalla i in. 2009], podobnie jak wykorzystanie ziemniaków [Bayr i in. 2014; Parawira i in. 2005].

Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie fermentacji metanowej samodzielnych substratów w postaci: wysłdków z jabłek, osadu czynnego z oczyszczalni, retentatu i ziemniaków odpadowych, a także oszacowanie ich biogazodochodowości na podstawie ilości uzyskanego biogazu, w tym zawartości metanu. Uzyskane wyniki badań dają podstawy do doskonalenia procesu fermentacji metanowej z użyciem wybranych substratów lub ich mieszanin, co ma znaczenie dla nauki i aplikacji takich procesów w praktyce.

## 2. Metodyka badań

### 2.1. Pomiar pH

Pomiaru pH dokonywano podczas każdego pobrania prób (Elmetron CP-215). W dwóch zlewkach umieszczano po 20 g materiału, który w dalszej kolejności łączono z 200 cm<sup>3</sup> wody demineralizowanej i pozostawiano na 0,5 h. Ostateczną wartość pH badanej próbki uzyskiwano jako wartość średnią z trzech kolejnych powtórzeń.

### 2.2. Oznaczanie zawartości suchej substancji

Oznaczenia suchej substancji dokonano metodą wagową, procedura według normy PN-EN 12880. W pierwszej kolejności pobrany z bioreaktora do dwóch wysuszonych do stałej masy aluminiowych foremek materiał ważono, a następnie umieszczano w suszarce. Foremki pozostawiano w suszarce na około 12 h, w temperaturze 105°C. Po upływie tego czasu próbki ważono ponownie. Analizę wykonano w trzech powtórzeniach dla każdego rodzaju substratu.

Procentową zawartość suchej substancji obliczono według następującego równania:

$$s.s. = \frac{(m_2 - m_3)}{m_1} \cdot 100,$$

gdzie:

s.s. – sucha substancja [%],

$m_1$  – masa próbki przed wysuszeniem [g],

$m_2$  – masa próbki po wysuszeniu [g],

$m_3$  – średnia masa foremki aluminiowej  $\approx 6,02$  g.

Odwrotnością zawartości suchej substancji materiału wyjściowego (świeżej substancji) jest wilgotność, którą oblicza się ze wzoru:

$$\alpha s. = 100 - s.m.$$

gdzie:

$\alpha s.$  – wilgotność (świeża substancja) [%],

$s.s.$  – sucha substancja [%].

### 2.3. Oznaczanie zawartości substancji organicznej

Oznaczenia suchej substancji dokonano metodą wagową, procedura według normy PN-EN 12879. Metoda oznaczania zawartości substancji organicznej polega na wagowym określeniu strat przy spalaniu (prażeniu) pobranej próby, w temperaturze 520°C. W wyniku prażenia otrzymujemy popiół (materię mineralną), natomiast zawarte w materiale związki organiczne przechodzą w stan lotny.

Przygotowane próbki, wysuszone w temperaturze 105°C i zmielone, poddawano analizie zawartości substancji organicznej. Każdą z prób analizowano w dwóch powtórzeniach. Spalenie przeprowadzano w piecu elektrycznym z wykorzystaniem tygli porcelanowych. Tygle uprzednio wyprażono w temperaturze 520°C do uzyskania stałej masy, następnie ostudzono i odważono 1 g próbki. Oznaczone tygle umieszczono w piecu elektrycznym i prażono w temperaturze 520±10°C przez 2 h. Po upływie dwóch godzin tygle ostudzono w ekcykatorze i zważono. Następnie ponownie wyprażono w piecu (czas: 1 h), ostudzono i zważono. Czynności te powtarzano aż do uzyskania wyników różniącymi się nie więcej niż o 0,001 g. Zawartość substancji organicznych w badanej próbce obliczono w stosunku do suchej masy próbek według równania:

$$S_{org.} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100,$$

gdzie:

$S_{org.}$  – zawartość substancji organicznej [%]

$m_1$  – masa próbki przez prażeniem [g],

$m_2$  – masa próbki po prażeniu [g].

### 2.4. Realizacja procesu fermentacji metanowej

Przygotowanie mieszanin fermentacyjnych (odpowiedni substrat połączony z inokulum) przeprowadzono, bazując na wartości suchej substancji, suchej substancji organicznej oraz pH substratów (tab. 1). Dążono do uzyskania pH = 7 – jest to odczyn charakterystyczny dla wsadu w fermentatorach funkcjonujących w biogazowni, jak również optymalny dla bakterii anaerobowych. Do sporządzenia mieszanin fermentacyjnych użyto: wysłodek z jabłek, osadu czynnego, retentatu oraz ziemniaków odpadowych. Jako inokulum zastosowano pulpę pofermentacyjną pochodzącą z pracującej biogazowni.

Próby przygotowano w następującym stosunku wagowym substrat/inokulum:

- wysłodki z jabłek/inokulum 100 g/1000 g,
- osad czynny/inokulum 600 g/400 g,
- retentat/inokulum 300 g/700 g,
- ziemniaki odpadowe/inokulum 100 g/900 g.

Przygotowany w opisany sposób surowiec poddano w dalszej kolejności fermentacji w biofermentorach zaprojektowanych i zbudowanych w Instytucie Inżynierii Biosystemów Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu [Pilarski, Dach, Pilarska 2010; Witaszek i in. 2013]. W doświadczeniu zostało użytych 9 fermentorów, znajdujących się w płaszczu wodnym o temperaturze 38°C (warunki mezofilne). Wyprodukowany biogaz magazynowano w zbiornikach wypełnionych wodą i oznaczonych podziałką. Wraz ze wzrostem wyprodukowanego gazu słup wody w zbiornikach malał. Biogaz transportowano drogą gazową ze zbiorników do aparatury pomiarowej, której zadaniem była analiza składu jakościowego wyprodukowanego gazu, ze względu na: metan, amoniak, siarkowodór, dwutlenek węgla, jak również kontrolnie – tlenu.

Doświadczenie zostało wykonane na podstawie niemieckiej normy DIN 38 414/S8: Bestimmung des Faulverhaltens *Schlamm Und Sediment* (Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1985), która jest najczęściej wykorzystywaną metodą w publikacjach europejskich (głównie niemieckich, austriackich i holenderskich) dotyczących procesu metanizacji. Norma zakłada m.in., że doświadczenie związane z badaniem wydajności biogazowej substratów (określenie maksymalnego uzysku biogazu oraz biometanu w jednostkach m<sup>3</sup>/Mg) należy zakończyć, gdy dzienna produkcja biogazu spadnie poniżej 1% całkowitej ilości wyprodukowanego biogazu. Realizacja eksperymentu, zgodnie z wytycznymi określonymi przez normę, trwała przez okres 40 dni. Wsad znajdujący się w reaktorach mieszano raz na dobę. Ilość wyprodukowanego biogazu mierzono w każdym dniu prowadzonych badań za pomocą umieszczonej na zbiornikach podziałki. Skład ilościowy sprawdzano w chwili, gdy poziom wyprodukowanego biogazu wynosił 1,1 dm<sup>3</sup>. Do badań zastosowano system typu MSMR-4/BIO firmy ALTER S.A. (stacjonarny analizator gazów w biogazie).

### 3. Wyniki badań i dyskusja

W badaniach wykorzystano substraty o zróżnicowanym pH. Stężenie jonów wodorowych wahało się od 4 do 6,8, jak pokazuje tab. 1. Odczyn środowiska, obok takich czynników, jak: temperatura, zawartość i rodzaj substancji odżywczych, obecność lub brak w otoczeniu wody, promieniowanie czy ciśnienie, jest jednym z istotniejszych czynników fizjochemicznych, limitujących rozwój mikroorganizmów [Alberts i in. 2002]. Optymalne pH podłoża dla większości mikroorganizmów beztlenowych wynosi 7-7,5. Warunek ten najlepiej spośród zastosowanych w pracy surowców spełnia osad czynny (pH = 6,71). Zasadniczo pH wynoszące 8,5 uważane jest za niekorzystne dla drobnoustrojów metanogennych (inhibujące ich rozwój),

podobnie jak pH niższe od 5, odpowiadające w doświadczeniu – wysłodkom z jabłek. Ilość inokulum (pH = 7,4) dla każdego z zastosowanych w doświadczeniu surowców dobrano m.in. na podstawie uzyskanych wartości pH – tak, aby proces przebiegał w warunkach stabilnych, bez ryzyka zakwaszenia środowiska [Pilarska i in. 2014]. Największą zawartość inokulum zastosowano w przypadku wysłodków z jabłek ze względu na ich niską wartość pH (4,01) oraz znaczną zawartość łatwo degradowalnych węglowodanów, których gwałtowna hydroliza mogłaby zdecydowanie przyspieszyć kolejne etapy fermentacji, czyli kwasogenezę oraz acetogenezę. O ilości inokulum w mieszaninach substrat/inokulum zdecydowały także wyniki suchej substancji oraz suchej substancji organicznej. Wykorzystane substraty charakteryzowały się odmienną zawartością suchej substancji, która wahała się od 1,50% dla retentatu i 2,33% – w przypadku osadu czynnego, do 20,87 oraz 33,15% – odpowiednio dla ziemniaków odpadowych i wysłodków z jabłek. Zawartość suchej substancji w biomacie poddanej procesowi fermentacji istotnie decyduje o charakterze procesu. Większość biogazowni pracuje, realizując fermentację mokrą, przede wszystkim ze względu na jej efektywność. Optymalna zawartość s.s. odpadów organicznych wprowadzanych do bioreaktora w postaci uwodnionej pulpy w fermentacji mokrej wynosi do 12% [Kuratorium für Technik und Bauwesen... 2011]. Zawartość suchej substancji organicznej w biomateriale ma z kolei bezpośredni wpływ na wydajność produkcji biogazu, a dokładnie na zawartość metanu. Zastosowane w pracy substraty charakteryzuje różny udział s.s.o., co także zdecydowało o doborze ilości inokulum. Dla retentatu ważąca była niska zawartość suchej substancji (1,50%), natomiast w przypadku ziemniaków odpadowych użycie znacznej ilości czynnika inicjującego (s.s.o. – 68,50%), skompensowało ich relatywnie niską zawartość suchej substancji organicznej (20%). Wpływ różnych stosunków inokulum do substratu (*inoculum-to-substrate ratios* – ISRs) podczas fermentacji słomy ryżowej na wydajność produkcji metanu badał również Chen i in. [2014], wykazując duże znaczenie tego czynnika w optymalizacji AD. Należy jednak podkreślić, że inokulum nie odgrywa decydującej roli w kwestii podniesienia zawartości węgla czy ogólnej poprawy bilansu składników mineralnych. W tym celu powszechnie realizuje się kofermentację (*anaerobic co-digestion* – AcoD) z innymi substancjami organicznymi [Sosnowski i in. 2007; Bohdziewicz i in. 2011; Pilarska i in. 2014]. Przedstawione badania dotyczą analizy wydajności biogazowej samodzielnego surowca i należy je traktować jako pilotażowe.

Eksperymenty prowadzone przez naukowców w zakresie optymalizacji fermentacji beztlenowej z różnymi surowcami obejmują, obok analiz suchej substancji, suchej substancji organicznej, monitoringu pH, LKT (lotnych kwasów tłuszczowych), LKT/zasadowość, badań aplikacji składników odżywczych, również dobór warunków termicznych [Montanés, Pérez, Solera 2014; Wan i in. 2011; Silvestre i in. 2014]. Omawiane doświadczenie przeprowadzono w warunkach mezofilnych (35-38°C), które umożliwiają najbardziej stabilną i produktywną realizację procesu. Warunki takie praktykowane są w większości polskich i zagranicznych biogazowni,



**Tabela 1.** Parametry badanych substratów**Table 1.** Parameters of the substrates

Nazwa próby*	pH	Sucha substancja [%]	Sucha substancja organiczna [%]
WJ	4,01	33,15	98,92
OS	6,71	2,33	44,95
R	5,41	1,50	60,39
Z	6,15	20,87	20,00
Inokulum	7,40	2,74	68,50

\* WJ – wysłodki z jabłek, OS – osad czynny, R – retentat, Z – ziemniaki odpadowe.

Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

w tym w biogazowniach niemieckich [Sorda, Sunak, Madler 2013; Kuratorium für Technik und Bauwesen... 2011]. Bardzo rzadko natomiast stosowane są temperatury podwyższone (warunki termofilne), które z jednej strony mogą przyspieszyć reakcje biochemiczne i zwiększyć stopień degradacji materii organicznej do metanu, z drugiej jednak nie zawsze skutkują wzrostem produkcji biogazu, co więcej, według autorów różnych prac [Dinsdale, Hawkes, Hawkes 1996; Kabouris i in. 2009] mogą przynieść niepożądane efekty w postaci niższej stabilności procesu, podwyższonej czułości na działanie inhibitorów i zwiększonego uwalniania lotnych kwasów tłuszczowych. Ponadto realizacja fermentacji metanowej w podwyższonej temperaturze jest procesem energochłonnym, co może podawać w wątpliwość jego stronę ekonomiczną oraz opłacalność produkcji metanu jako źródła energii z wykorzystaniem tej właśnie metody.

Podjęte kroki analityczne oraz przyjęte warunki procesowe pozwoliły na prawidłowy przebieg fermentacji metanowej i oszacowanie wydajności biogazowej badanych substratów. Wyniki dotyczące tego etapu pracy przedstawiono w tab. 2.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono odpowiednio ilość biogazu oraz metanu uzyskanego z analizowanych substratów w odniesieniu do ich świeżej substancji. Ze względu na koszty logistyczne oraz tzw. gospodarkę substratową wyniki te są istotne, gdyż pozwalają na bezpośrednie oszacowanie efektu ekonomicznego, tj. kosztów poniesionych na transport 1 tony substratu z wykorzystaniem paliw konwencjonalnych (przykładowo oleju napędowego) w stosunku do uzyskanych wydajności biogazowych. Największą ilość biogazu, w tym również metanu, otrzymano dla wysłodków z jabłek i ziemniaków odpadowych.

W tabeli 2 zestawiono również ilości biogazu i metanu w odniesieniu do suchej substancji substratów poddanych procesowi fermentacji. Takie ujęcie rezultatów badań pozwala na pewną charakterystykę materiałów. Z punktu widzenia tak przedstawionych wartości najbardziej biogazodochodne okazały się ziemniaki odpa-

**Tabela 2.** Ilość biogazu i metanu uzyskana ze świeżej substancji, suchej substancji oraz suchej substancji organicznej – dla badanych substratów

**Table 2.** The amount of biogas and methane obtained from fresh matter, dry matter and dry matter of organic – for the substrates tested

Nazwa próby*	Ilość biogazu [m <sup>3</sup> /t ś.s.]	Ilość metanu [m <sup>3</sup> /t ś.s.]	Ilość biogazu [m <sup>3</sup> /t s.s.]	Ilość metanu [m <sup>3</sup> /t s.s.]	Ilość biogazu [m <sup>3</sup> /t s.s.o.]	Ilość metanu [m <sup>3</sup> /t s.s.o.]
WJ	203,64	101,36	614,31	305,77	621,02	309,11
OS	4,38	2,21	188,19	94,78	418,66	210,85
R	7,67	3,01	511,46	200,60	846,93	332,18
Z	132,98	66,74	637,18	319,78	672,99	337,75

\* WJ – wysłodki z jabłek, OS – osad czynny, R – retentat, Z – ziemniaki odpadowe.

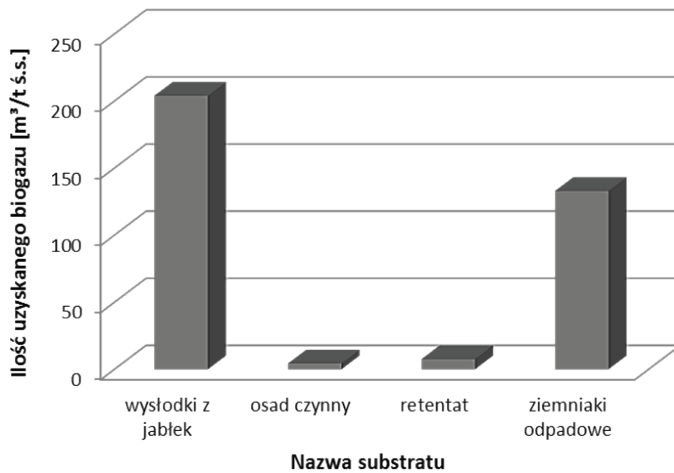
Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

dowe i wysłodki z jabłek (637,18 m<sup>3</sup>/t s.s. – Z, 614,31 m<sup>3</sup>/t s.s. – WJ;). Retentat, jako relatywnie wydajne źródło biogazu (511,46 m<sup>3</sup>/t s.s.), charakteryzował się słabą zawartością metanu w biogazie (200,60 m<sup>3</sup>/t s.s.), co świadczy o tym, że materiał niniejszy nie stwarza dogodnych warunków środowiskowych dla aktywności i rozwoju bakterii metanogennych. Najgorsze rezultaty otrzymano dla osadu czynnego (tylko 94,78 m<sup>3</sup>/t s.s.).

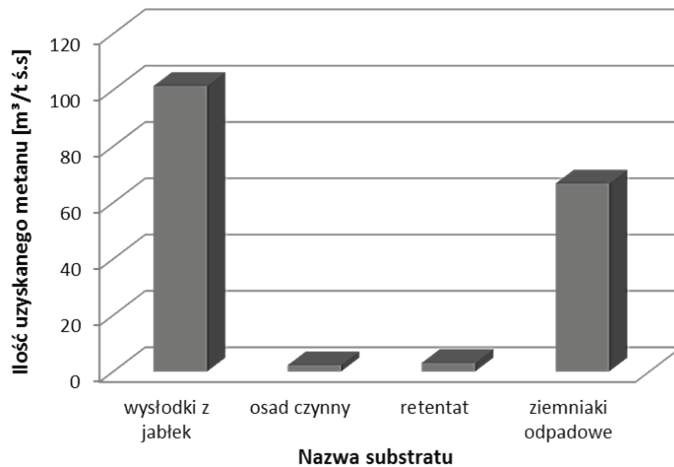
Prezentacja wyników pod kątem uzysku biogazu z suchej substancji organicznej dowiodła największej wydajności wytwarzania biogazu z udziałem retentatu (846,93 m<sup>3</sup>/t s.s.o.), a w dalszej kolejności – ziemniaków odpadowych (672,99 m<sup>3</sup>/t s.s.o.). Na wysoką ilość otrzymanego biogazu z retentatu duży wpływ miała jego znaczna zawartość suchej substancji organicznej (tab. 1). Dużo mniej wydajnym materiałem okazał się ponownie osad czynny (418,66 m<sup>3</sup>/t s.s.o.).

Otrzymane wartości są zbliżone lub korzystniejsze, również ze względu na aspekty ekonomiczne, w porównaniu z przedstawionymi w literaturze [Ledakowicz, Krzystek 2005; Parawira i in. 2005; Linke 2006]. Linke [2006] przeprowadził w swojej pracy fermentację metanową ziemniaków odpadowych w warunkach termofilnych (55°C), podczas której substraty dostarczane były w sposób ciągły. Autor odnotował spadek wydajności produkcji biogazu i metanu wraz ze wzrostem ilości wsadu. Z kolei Parawira i in. [2005] zastosował w badaniach, również zrealizowanych z wykorzystaniem ziemniaków, aplikację wyselekcjonowanych bakterii hydrolitycznych w celu poprawy wydajności procesu oraz określenia aktywności odpowiednich enzymów. Największą aktywność zarejestrował dla amylazy, karboksymetylocelulazy, celulazy, dużo niższą natomiast dla proteazy i pektynazy. Uzyskana przez badacza ilość metanu z suchej substancji organicznej jest bardzo zbliżona do wartości przedstawionej w tab. 2. Zgodnie z doniesieniami literaturowymi wytloki z jabłek wykorzystywane są najczęściej jako kosubstrat z odpadami poubojowymi



**Rys. 1.** Ilość biogazu uzyskanego ze świeżej substancji, dla badanych substratów  
**Fig. 1.** The amount of the biogas obtained from fresh matter, for the substrates tested

Źródło: opracowanie własne.  
 Source: own elaboration.



**Rys. 2.** Ilość metanu uzyskanego ze świeżej substancji, dla badanych substratów  
**Fig. 2.** The amount of the methane obtained from fresh matter, for the substrates tested

Źródło: opracowanie własne.  
 Source: own elaboration.

[Coalla i in. 2009], kiedy istnieje możliwość wyprodukowania większej ilości biogazu z suchej substancji (ok.  $800 m^3/t$ ), jak również z gnojowicą świńską [Kafle, Kim 2013], której połączenie z odpadowymi jabłkami może przynieść wzrost produkcji biogazu o 16 i 48%, w odpowiednio mezofilnych i termofilnych warunkach. Autorzy

prac zwracają również uwagę, iż wzrost wydajności produkcji biogazu nie zawsze jest równoznaczny ze wzrostem zawartości w nim metanu, na co istotny wpływ ma dobór substratów i przyjęte warunki procesowe. Przedstawione w niniejszej pracy wyniki wyraźnie pokazały (wykres na rys. 1 i 2), że osad czynny, podobnie jak retentat, ze względów ekonomicznych oraz technologicznych, powinien być stosowany wyłącznie jako kosubstraty z innymi surowcami, przykładowo z odpadami tłuszczowymi [Grosser i in. 2013; Miodoński, Iskra 2011]. Zarówno jeden, jak i drugi substrat zawiera znikomą ilość substancji stałej.

#### 4. Zakończenie

1. Największą ilość biogazu ( $203,64 \text{ m}^3/\text{t s.s.}$ ), w tym metanu ( $101,36 \text{ m}^3/\text{t s.s.}$ ), z tony świeżej substancji uzyskano, poddając fermentacji metanowej wysłodka z jabłek.

2. Próba osadu czynnego i retentatu charakteryzuje się bardzo niską zawartością suchej substancji (odpowiednio 2,33% i 1,50%), co było przyczyną niewielkiego uzysku biogazu ( $4,48 \text{ m}^3/\text{t s.s.}$  i  $7,67 \text{ m}^3/\text{t s.s.}$ ) oraz metanu ( $2,21 \text{ m}^3/\text{t s.s.}$  i  $3,01 \text{ m}^3/\text{t s.s.}$ ) w przeliczeniu na świeżą masę – w procesie realizowanym z udziałem tych substratów. Ilość wytworzonego biogazu w odniesieniu do suchej substancji organicznej dla retentatu była jednak znaczna ( $846,93 \text{ m}^3/\text{t s.s.}$ ).

3. Osad czynny, zgodnie z otrzymanymi wynikami, jest najmniej biogazodochodowym substratem. Realtywnie niska zawartość w tym materiale zarówno suchej substancji, jak i suchej substancji organicznej dyskwalifikuje jego zastosowanie w charakterze niezależnego wsadu do biogazowni.

4. Ziemniaki odpadowe okazały się, obok wysłodków z jabłek, dobrym substratem do pozyskiwania metanu na drodze fermentacji metanowej. Uzyskane w tym przypadku ilości metanu to odpowiednio:  $319,78 \text{ m}^3/\text{t s.s.}$  i  $337,75 \text{ m}^3/\text{t s.s.o.}$

#### Literatura

- Alberts B., Johnson A., Lewis J., Raft M., Roberts K., Walter P., 2002, *Molecular Biology of the Cell*, Garland Science, 4<sup>th</sup> Edition.
- Bayr S., Ojanperä M., Kaparaju P., Rintala J., 2014, *Long-term thermophilic mono-digestion of rendering wastes and co-digestion with potato pulp*, "Waste Management", vol. 34, s. 1853-1859.
- Bohdziewicz J., Kuglarz M., Mrowiec B., 2011, *Ocena podatności bioodpadów kuchennych i osadów ściekowych do kofermentacji w warunkach statycznych*, Proceedings of ECOpole, vol. 5, no. 1, s. 197-202.
- Chen X., Zhang Y., Gu Y., Liu Z., Shen Z., Chu H., Zhou X., 2014, *Enhancing methane production from rice straw by extrusion pretreatment*, "Applied Energy", vol. 122, s. 34-41.
- Coalla H.L., Fernández J.M.B., Morán M.A.M., Bobo M.R.L., 2009, *Biogas generation apple pulp*, "Bioresource Technology", vol. 100, s. 3843-3847.
- Dinsdale R.M., Hawkes F.R., Hawkes D.L., 1996, *The mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of coffee waste containing grounds*, "Water Research", vol. 30, no. 2, s. 371-377.

- Gomez X., Cuetos M.J., Cara J., Moran A., Garcia A.I., 2006, *Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes. Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate*, "Renewable Energy", vol. 31, s. 2017-2024.
- Grosser A., Worwasz M., Neczaj E., Grobelak A., 2013, *Pólciągla kofermentacja osadów ściekowych i odpadów tuczczowych pochodzenia roślinnego*, „Roczniki Ochrona Środowiska”, vol. 15, s. 2108-2125.
- Kabouris J.C., Tezel U., Pavlostathis S.G., Engelmann M., Dulaney J., Gilletle R. i in., 2009, *Methane recovery from anaerobic co-digestion of municipal sludge and FOG*, "Bioresource Technology", vol. 100, s. 3701-3705.
- Kafle G.K., Kim S.H., 2013, *Anaerobic treatment of apple waste with swine manure for biogas production: Batch and continuous operation*, "Applied Energy", vol. 103, s. 61-72.
- Kowalczyk-Juśko A., 2011, *Efektywność produkcji biogazu z odpadów rolniczych i przetwórstwa rolno-spożywczego*, Zeszyty Naukowe Południowo-Wschodniego Oddziału Polskiego Towarzystwa Inżynierii Ekologicznej i Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego, nr 11, s. 149-154.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 2011, *Biogaz – produkcja i wykorzystywanie (Poradnik BIOGAZ)*, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig.
- Kymäläinen M., Lähde K., Arnold M., Kurola J.M., Romantschuk M., Kautola H., 2012, *Biogasification of biowaste and sewage sludge – measurement of biogas quality*, "Journal of Environmental Management", vol. 95, s. 122-127.
- Ledakowicz S., Krzystek L., 2005, *Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego*, „Biotechnologia” vol. 70, nr 3, s. 165-183.
- Linke B., 2006, *Kinetic study of thermophilic anaerobic digestion of solid wastes from potato processing*, "Biomass and Bioenergy", vol. 30, s. 892-896.
- Luostarinen S., Luste S., Sillanpää M., 2009, *Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant*, "Bioresource Technology", vol. 100, s. 79-85.
- Miodoński S., Iskra K., 2011, *Ocena efektywności procesu skojarzonej fermentacji oraz odpadów tuczczowych na przykładzie oczyszczalni ścieków w Brzegu*, „Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych”, nr 47, s. 62-69.
- Montanés R., Pérez M., Solera R., 2014, *Anaerobic mesophilic co-digestion of sewage sludge and sugar beet pulp lixiviation in bath reactors: Effect of pH control*, "Chemical Engineering Journal", vol. 255, s. 492-499.
- Parawira W., Murto M., Read J.S., Mattiasson B., 2005, *Profile of hydrolases and biogas production during two-stage mesophilic anaerobic digestion of solid potato waste*, "Process Biochemistry", vol. 40, no. 9, s. 2945-2952.
- Pilarska A., Pilarski K., Krysztofiak A., Dach J., Witaszek K., 2014, *Impact of organic additives on biogas efficiency of sewage sludge*, "Agricultural Engineering", vol. 151, no. 3, s. 139-148.
- Pilarska A., Pilarski K., Myszcza M., Boniecki P., 2013, *Perspektywy i problemy rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce*, „Technika Rolnicza, Ogrodnicza i Leśna”, nr 4, s. 2-4.
- Pilarski K., Dach J., Mioduszczyńska N., 2010, *Comparison of efficiency of methane production from liquid muck and dung with refined glycerin addition*, "Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering", vol. 55, no. 2, s. 78-81.
- Pilarski K., Dach J., Pilarska A., 2010, *Preferowane kierunki rolniczego zagospodarowania odpadów z produkcji biopaliw*, „Technika Rolnicza, Ogrodnicza i Leśna”, nr 3, s. 5-7.
- Scano E.A., Asquer C., Pistis A., Ortu L., Demontis V., Daniele Cocco D., 2014, *Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant*, "Energy Conversion and Management", vol. 77, s. 22-30.
- Silvestre G., Illa J., Fernández B., Bonmati A., 2014, *Thermophilic anaerobic co-digestion of sewage sludge with grease yield and its dewatering properties*, "Applied Energy", vol. 117, s. 87-94.

- Sorda G., Sunak Y., Madler R., 2013, *An agent-based spatial simulation to evaluate the promotion of electricity from agricultural biogas*, "Ecological Economics", vol. 89, s. 43-60.
- Sosnowski P., Klepacz-Smolka A., Kaczorek K., Ledakowicz S., 2007, *Kinetic investigations of methane co fermentation of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes*, "Bioresource Technology", vol. 99, s. 5731-5737.
- Wan C., Zhou Q., Fu G., Li Y., 2011, *Semi continous anaerobic co-digestion of Thickened waste activated sludge and fat, oil and grease*, "Waste Management", vol. 31, s. 1752-1758.
- Witaszek K., Pilarski K., Czekala W., Mazur R., 2013, *Zasady doboru substratów do biogazowni rolniczej*, „Instal”, nr 5, s. 14-16.
- Witaszek K., Pilarski K., Janczak D., Czekala W., Lewicki A., Carmona P.C.R., Dach J., Mazur R., 2013, *The possibilities of green wastes from urban areas management for energetic and fertilizer purposes*, "Archives of Waste Management and Environmental Protection", vol. 15, no. 4, s. 21-28.

## THE USE OF METHANE FERMENTATION IN THE DEVELOPMENT OF SELECTED WASTE PRODUCTS OF FOOD INDUSTRY

**Summary:** The increase in the amount of waste and organic pollutants in recent years, related to, among others, the increased food production, is a growing problem. Taking into account the need for their disposal, and their natural origin and chemical composition, the most useful and economical methods of degradation are biotechnological methods including methane fermentation. The aim of this study was the biodegradation of selected waste products of food industry using methane fermentation and verification of susceptibility of used substrates in the process of methanation. The scope of the research included a preliminary analysis of the material (pH, conductivity, dry matter, organic dry matter), the conduction of methane fermentation and the estimation of the biogas and methane quantities. The study involved the following substrates: apples pulp, black sludge (sludge from sewage), retentate (sediment from the fruit filtration) and ground potatoes. The highest amount of biogas was obtained from a ton of fresh weight of the sample containing apple pulp. Significant results were also obtained from the ground potatoes and retentate, which – despite low dry matter content – allow for a high yield of biogas.

**Keywords:** industrial waste, waste inertization, anaerobic digestion, biogas production.