

AGNIESZKA PILARSKA<sup>1</sup>, KRZYSZTOF PILARSKI<sup>2</sup>, KAMIL WITASZEK<sup>2</sup>,  
HANNA DUKIEWICZ<sup>3</sup>, KRZYSZTOF DOBRZAŃSKI<sup>4</sup>

<sup>1</sup>InstituT Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

<sup>2</sup>InstituT Inżynierii Biosystemów  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

<sup>3</sup>InstituT Chemicznej Technologii Drewna  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

<sup>4</sup>Technika Sp. z o.o. w Poznaniu

## WSTĘPNE BADANIA WPŁYWU OBRÓBKI TERMICZNEJ KISZONKI Z KUKURYDZY NA WYDAJNOŚĆ BIOGAZOWĄ\*

### PRELIMINARY RESEARCH ON THE EFFECT OF THERMAL TREATMENT OF MAIZE SILAGE ON BIOGAS PRODUCTION

**Streszczenie.** Wydajność procesu fermentacji metanowej zależy przede wszystkim od rodzaju zastosowanych substratów oraz szybkości przebiegu procesu, która w głównej mierze jest warunkowana dynamiką pierwszego etapu fermentacji, czyli hydrolizy. Celem poprawy rozkładu trudno biodegradowalnego materiału (w literaturze określanego mianem biomasy lignocelulozowej) stosuje się często wstępną obróbkę substratów, m.in.: termiczną, chemiczną i mechaniczną. W przedstawionych badaniach dokonano obróbki termicznej z wykorzystaniem ciepła odpadowego z procesu fermentacji metanowej, które jest trudnym do zmagazynowania surowcem. Idea wykorzystania ciepła pochodzącego z fermentacji metanowej jest innowacyjnym rozwiązaniem, o znaczącym aspekcie ekonomicznym oraz prośrodowiskowym. Głównym celem pracy było zbadanie wpływu obróbki termicznej na wydajność biogazową. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem jednego z najczęściej stosowanych do produkcji biogazu surowców – kiszonki z kukurydzy, którą poddano obróbce cieplnej w temperaturze 80°C i 100°C.

**Słowa kluczowe:** fermentacja metanowa, biomasa, wydajność biogazowa, obróbka wstępna substratów, ciepło odpadowe

---

\*Pracę zrealizowano w ramach grantu Narodowego Centrum Nauki na lata 2010-2013 nr N N313 432539: „Ocena wartości nawozowej i wpływu na glebę pulpy pofermentacyjnej powstającej w procesie wytwarzania biogazu z wykorzystaniem różnych substratów organicznych”.

## Wstęp

W ostatnich latach bardzo popularne stało się wytwarzanie energii elektrycznej i ciepłej z biomasy, odpadów zwierzęcych oraz odpadów przemysłowych. Najprostszym sposobem uzyskania energii z odpadów jest poddanie surowca fermentacji beztlenowej (ang. *anaerobic digestion*) w kontrolowany sposób. Bezpośrednim źródłem energii w tym procesie jest metan, którego wysoka wydajność produkcji stanowi nadrzędny cel użytkowników biogazowni rolniczych. Skuteczność fermentacji metanowej zależy od kombinacji różnych czynników. Najważniejsze z nich to rodzaj stosowanych substratów oraz kinetyka ich mikrobiologicznego rozkładu. Odpowiedni dobór substratów oraz dodatków (mikro- i makroelementów, uczestniczących w metabolizmie bakterii) stwarza realne warunki poprawy wydajności fermentacji metanowej (Ahring, 2003; Vavilin i in., 2008). W prowadzonych obecnie badaniach coraz większy nacisk kładzie się na pełne zrozumienie procesów mikrobiologicznych jako klucza do sukcesu. Obok znaczącej wydajności procesu istotne jest także otrzymanie sterylnego pofermentu, wolnego od chorobotwórczych mikroorganizmów, z uwagi na możliwość jego późniejszego zastosowania w charakterze nawozu.

Wydajność procesu fermentacji w głównej mierze jest kształtowana przez szybkość procesu oraz biodegradowalność substratów. Zasadniczo na szybkość przebiegu procesów wpływ ma ten etap, który przebiega najwolniej. W przypadku fermentacji metanowej jest to hydroliza surowców. Hydroliza stanowi pierwszy etap rozkładu biomasy organicznej i najłatwiej przebiega w przypadku substratów o wysokiej biodegradowalności, natomiast stosowane bardzo często w produkcji metanu rośliny energetyczne i odpady roślinne stwarzają znaczne ograniczenia (Dinamarca i in., 2003). W literaturze substraty tego typu są określane mianem biomasy lignocelulozowej (ang. *lignocellulosic biomass*), na którą składają się celuloza, hemiceluloza oraz lignina, w określonych proporcjach. Z tych trzech składników lignina jest najbardziej odporna na rozkład: nierozpuszczalna w wodzie i oporna na działanie mikroorganizmów (Fengel i Wegener, 1994). Zdecydowanie bardziej podatnymi na biodegradację substancjami są frakcje organicznych odpadów komunalnych czy odpadów z przemysłu spożywczego (Carlsson i in., 2012; Cuetos i in., 2010; Nizami i in., 2009).

Obecnie coraz częściej testom poddaje się różnego rodzaju metody tzw. obróbki wstępnej, przeznaczone dla określonych rodzajów substratów. Zadaniem obróbki cieplnej jest przyspieszenie procesu hydrolizy substratów, a docelowo poprawa wydajności procesu fermentacji metanowej poprzez: rozpuszczanie osadów, zmniejszanie ich lepkości i gęstości czy rozwijanie powierzchni biomasy (przez redukcję rozmiarów cząstek), jak również wstępna likwidacja chorobotwórczych mikroorganizmów (Hendriks i Zeeman, 2009; Izumi i in., 2010; Sahlström i in., 2008). W praktyce wyróżnia się: obróbkę termiczną, chemiczną (do wszelkiego rodzaju substratów), mechaniczną (również z zastosowaniem ultradźwięków; pozostałości ścieków z oczyszczalni, odpady z przemysłu rolno-spożywczego), zamrażania/rozmarzania, mikrofalową, a także z użyciem pulsacyjnego pola elektrycznego (najczęściej odpady z oczyszczalni ścieków, obornik i inne). Bardzo często w celu uzyskania lepszego efektu wstępnych zabiegów odpowiednie metody łączy się ze sobą, przykładowo: termiczną z chemiczną lub mechaniczną (Pilli i in., 2011). W przypadku rozkładu materiału lignocelulozowego

szczególnie skuteczne, jak potwierdzają badania, jest połączenie chemicznej obróbki (kwasami lub zasadami) z termiczną (podwyższona temperatura).

Jedną z najbardziej powszechnych metod chemicznej obróbki biomasy jest hydroliza kwasowa. Do tego celu najczęściej stosowany jest kwas siarkowy, rzadziej kwas solny. Proces hydrolizy prowadzony jest zazwyczaj w podwyższonej temperaturze (140-190°C) i przy podwyższonym ciśnieniu. Czas reakcji wynosi od kilku do kilkudziesięciu minut (Zhang i Shahbazi, 2011). Podstawową reakcją zachodzącą podczas procesu kwasowej obróbki biomasy jest degradacja hemicelulozy. Rozpuszczone oligomery są przekształcane w prostsze formy: lotne kwasy tłuszczowe, cukry proste (głównie ksylózę), ale także inhibitory: furfural i hydroksymetylofurfural (Hendriks i Zeeman, 2009). Stężenia tych produktów zależą od temperatury i stężenia zastosowanego kwasu, przy czym rozpuszczanie hemicelulozy oraz wytrącanie ligniny jest bardziej efektywne z zastosowaniem kwasów silnie stężonych (Michalska i in., 2010). Niewątpliwą zaletą tej metody hydrolizy jest niemal całkowite rozpuszczenie hemicelulozy (do 90%).

Określone związki inhibujące, uwalniane z substancji lignocelulozowych pod wpływem wysokiej temperatury, prowadzą swym działaniem do niekorzystnych następstw, również w przebiegu fermentacji metanowej. Furfural – najważniejszy inhibitor – przemysłowo otrzymuje się przez hydrolizę pentozanów, zawartych w odpadach przemysłu celulozowego, słomie czy otrębach zbożowych. W tych samych warunkach, w jakich zachodzi hydroliza, cukry ulegają dehydratacji i cyklizacji z utworzeniem fufuralu. Związek ten z powodzeniem otrzymuje się również ze zmielonych kolb kukurydzy, poprzez ogrzewanie materiału roślinnego z 10-procentowym kwasem, co jest informacją istotną dla interpretacji rezultatów niniejszej pracy. Mechanizm tworzenia hydroksymetylofurfuralu (HMF) w drodze bezpośredniej dehydratacji cukrów, inaczej określanej również jako proces karmelizacji, w odniesieniu do cieplnej obróbki żywności opisał Kroh (1994). W kolejnych latach proces ten był opisywany w wielu pracach badawczych w odniesieniu do różnych układów i warunków realizacji, głównie związanych z temperaturą oraz pH. Najogólniej rozkład przebiega od rozkładu węglowodanu (przykładowo sacharozy, celulozy) do cukrów prostych (glukozy, fruktozy), a następnie hydroksymetylofurfuralu, ostatecznie zdegradowanego do furfuralu. Ostatni etap odbywa się z uwolnieniem H<sup>+</sup>, co może prowadzić w mniejszym lub większym stopniu do zmniejszenia wartości pH środowiska (Quintas i in., 2007). Stwierdzono, że inicjacja karmelizacji jako niekorzystnego zjawiska, przyczyniającego się do pogorszenia jakości materiału, odbywa się w zakresie temperatur od 60 do 100°C. Intensyfikacja procesu następuje wraz ze wzrostem temperatury i zależy od budowy chemicznej związku (cukry, białka) (Ajandouz i in., 2008).

Stosowanie zbyt wysokiej temperatury obróbki może w niektórych przypadkach doprowadzić także do formowania materiału opornego (ang. *refractory compounds*) na rozkład, a ponadto do uwalniania toksycznych związków. Innym przykładem niekorzystnych zmian zachodzących pod wpływem wysokiej temperatury jest obróbka termiczna odpadów poubojowych (często stosowanych jako wsad do biogazowni), podczas której uwalniany jest amoniak (pochodzący z rozkładu białek, reakcja Maillarda), który może destabilizować proces fermentacji metanowej wskutek gwałtownej zmiany pH (Battimelli i in., 2009). Poza warunkami termicznymi istotną rolę w opisywanym procesie odgrywiają rodzaj i ilość substratów. Alternatywą za pewnością może być meto-

da mechaniczna (rozdrabnianie, wirowanie, wytłaczanie) oraz inne wymienione, których stosowanie nie powoduje powstawania inhibitorów. Tego rodzaju działanie zwiększa znacznie podatność biomasy na biodegradację, ale w przypadku wielu substratów nie jest dostatecznie efektywne. Dyskusja zatem w sprawie doboru optymalnej obróbki wstępnej w procesie fermentacji beztlenowej w dalszym ciągu pozostaje otwarta.

W przedstawionej pracy zastosowano obróbkę termiczną substratów, przede wszystkim z uwagi na jej znaczne efekty w zakresie poprawy wydajności produkcji biogazu. Technika ta w porównaniu z pozostałymi (chemiczną, mikrofalową) jest prosta w realizacji i może być wykorzystana w odniesieniu do szerokiego spektrum substratów. Obróbkę cieplną prowadzi się w niskich ( $< 100^{\circ}\text{C}$ ) lub w wysokich ( $> 100^{\circ}\text{C}$ ) temperaturach, przy odpowiednim ciśnieniu. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest ogrzewanie za pomocą gorącej pary wodnej o temperaturze  $133^{\circ}\text{C}$ , przy ciśnieniu 0,3 MPa w czasie 20 min lub w temperaturze  $70^{\circ}\text{C}$ , przez minimalny czas 60 min (Kepp i in., 2000). W substratach zawierających kiszonkę z kukurydzy wymagana jest wyższa temperatura, ponieważ biomasa lignocelulozowa ulega destabilizacji dopiero od  $150^{\circ}\text{C}$ , dzięki czemu staje się bardziej dostępna dla bakterii metanowych (Bobleter, 1994).

Ważące pozostają również względy ekonomiczne, z myślą o których autorzy niniejszej pracy zaproponowali innowacyjną i niespotykaną w literaturze metodę wykorzystania do obróbki biomasy tzw. ciepła odpadowego z procesów fermentacji. Fermentacja metanowa jest procesem egzotermicznym, w wyniku którego powstaje biogaz, który następnie jest spalany w kogeneratorach, co wiąże się z dodatkową emisją ciepła. Energia cieplna niesie duży potencjał, ale też stwarza problemy podczas magazynowania. Z tego powodu pojawiają coraz to nowsze pomysły na jej zagospodarowanie. Jedną z najbardziej popularnych metod jest wykorzystanie ciepła w suszarnictwie, jak również do ogrzewania budynków gospodarczych lub mieszkalnych. Coraz częściej rozważa się również magazynowanie ciepła w tzw. akumulatorach cieplnych (Jastrzębska, 2007). Idea wykorzystania ciepła uwalnianego w procesie produkcji biogazu do wstępnej obróbki substratów ma wiele zalet, głównie ze względów ekonomicznych i środowiskowych.

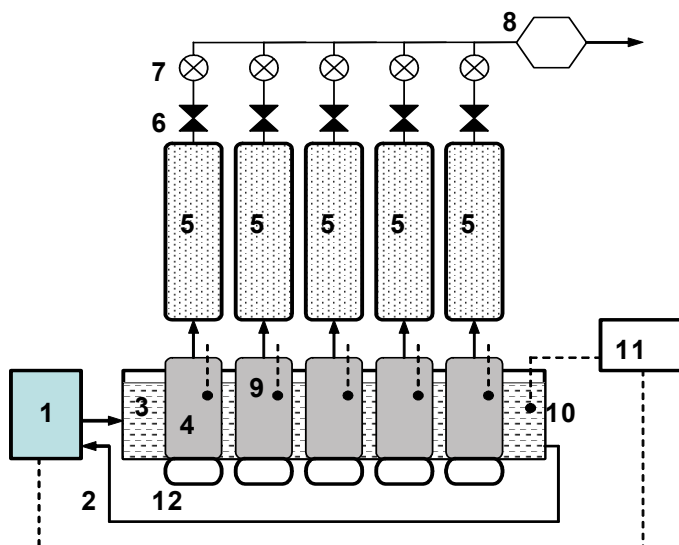
Celem niniejszych badań było zatem wskazanie jednego z kierunków zagospodarowania ciepła powstającego w procesie spalania metanu. Uzyskane ciepło („odpadowe”) wykorzystano do obróbki cieplnej substratów w celu zwiększenia wydajności procesu fermentacji oraz skrócenia czasu retencji badanych materiałów. W trakcie badań sprawdzono również wpływ *pre-treatmentu* temperaturowego na wydajność powstałego w czasie fermentacji biogazu.

## Material i metody

Do badań użyto kiszonki z kukurydzy służącej jako wsad do biogazowni w Świdnicy (woj. dolnośląskie). Surowiec poddano obróbce termicznej w dwóch wariantach. W pierwszym wariantcie substrat ogrzewano w temperaturze  $100^{\circ}\text{C}$ , przez 15 min – w warunkach ciśnienia atmosferycznego (0,1 MPa). Druga metoda polegała na tzw. autoklawowaniu, czyli umieszczeniu substratu w hermetycznie zamkniętym naczyniu, ogrzewanym od zewnątrz. W tym przypadku proces prowadzono w temperaturze  $80^{\circ}\text{C}$ ,

pod zwiększonym ciśnieniem (0,2-0,25 MPa), aż do momentu, w którym substrat ulegał procesowi zbliżonemu do „gotowania”.

Przygotowany w opisany sposób surowiec w dalszej kolejności poddano fermentacji w biofermentorach, zaprojektowanych i zbudowanych (rys. 1) w Instytucie Inżynierii Biosystemów Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu (Pilarski i in., 2010). W doświadczeniu zastosowano dziewięć fermentorów, znajdujących się w płaszczu wodnym o temperaturze 35-38°C w celu zapewnienia mezofilowych warunków fermentacji. Wyprodukowany biogaz magazynowano w zbiornikach z podziałką, wypełnionych wodą. Biogaz przepływał ze zbiorników do aparatury pomiarowej, której zadaniem była analiza składu jakościowego gazu: metanu, amoniaku, siarkowodoru i dwutlenku węgla, jak również kontrola tlenu.



Rys. 1. Schemat biofermentora do badań produkcji biogazu: 1 – ogrzewacz wody z regulatorem temperatury, 2 – izolowane przewody cieczy ogrzewającej, 3 – płaszcz wodny o temperaturze 36-41°C, 4 – biofermentor z wsadem o pojemności 1,4 dm<sup>3</sup>, 5 – zbiorniki na biogaz, 6 – zawory odcinające, 7 – przepływomierze gazowe, 8 – analizator gazowy (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub>), 9 – sensor pH, 10 – sensor temperatury, 11 – centrala sterująco-rejestrująca, 12 – mieszadła magnetyczne wsadu

Fig. 1. Biofermenter scheme for biogas production investigations: 1 – water heater with temperature controller, 2 – isolated hot liquid tube, 3 – layer of water at temperature of 36-41°C, 4 – biofermenter with the input of 1.4 dm<sup>3</sup>, 5 – biogas containers, 6 – safety valves, 7 – biogas flowmeters, 8 – gas analyser (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub>), 9 – pH sensor, 10 – temperature sensor, 11 – controlling and registering central, 12 – input magnetic stirrers

Doświadczenie prowadzono przez 40 dni w stałej temperaturze 38°C. Pomiaru powstałego biogazu dokonywano zgodnie z normą DIN 38 414, 1985 (1985) – według metody najczęściej wymienianej w publikacjach europejskich (głównie niemieckich, austriackich i holenderskich) odnoszących się do metanizacji. Wsad znajdujący się w reaktorach był mieszany co 24 h. Ilość wyprodukowanego biogazu mierzono w każdym dniu badań za pomocą umieszczonej na zbiornikach podziałki. Skład jakościowy gazu sprawdzano w chwili, kiedy ilość produkowanego biogazu wyniosła 1,1 dm<sup>3</sup>. Do badań składu zastosowano stacjonarny analizator gazów w biogazie typu MSMR-4/BIO firmy Alter S.A. Kiszonkę z kukurydzy wymieszano z pulpą pofermentacyjną w celu uzyskania 5-procentowej suchej masy wsadu. Pochodząca z tzw. pracującej biogazowni pulpa pełniła jednocześnie funkcję czynnika inicjującego.

W rzeczywistości proces fermentacji prowadzony jest w sposób ciągły, co oznacza, że część materiału jest stale dodawana do komory, a część odbierana. Dlatego w doświadczeniach laboratoryjnych konieczne jest „zaszczepienie” prób mikroorganizmami, niezbędnymi do zainicjowania i przeprowadzenia procesu fermentacji (Amon i in., 2007). W tabeli 1 zaprezentowano podstawowe właściwości fizyczno-chemiczne badanej kiszonki z kukurydzy oraz zastosowanego czynnika inicjującego.

Tabela 1. Parametry fizyczno-chemiczne zastosowanych substratów

Table 1. Physicochemical parameters of the used substrates

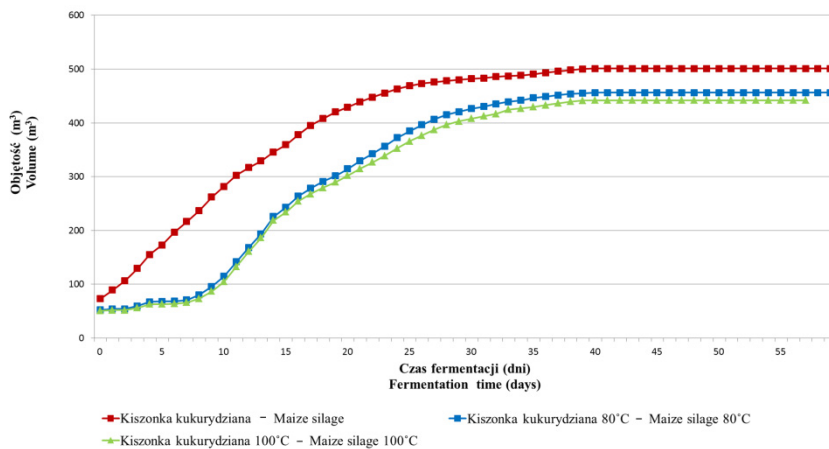
Substrat Substrate	Sucha masa Dry matter (%)	Sucha masa organiczna Organic dry matter (%)	pH	Konduktywność Conductivity (mS·m <sup>-1</sup> )
Kiszonka z kukurydzy Maize silage	32,77	96,22	3,47	0,75
Czynnik inicjujący (pulpa z biogazowni) Initiation factor (pulp from biogas plant)	1,33	72,83	7,25	4,96

## Wyniki i dyskusja

Ilość biogazu wytwarzanego z kiszonki z kukurydzy w drodze fermentacji metanowej prowadzonej w sposób tradycyjny oraz z zastosowaniem obróbki termicznej przedstawiono na rysunkach. Na rysunkach 2 i 3 zilustrowano skumulowaną produkcję biogazu i metanu bez zastosowania obróbki termicznej substratu oraz z uwzględnieniem wstępnego ogrzewania substratów w temperaturze 80 i 100°C, w zależności od zawartości suchej masy w mieszaninie poddanej fermentacji metanowej.

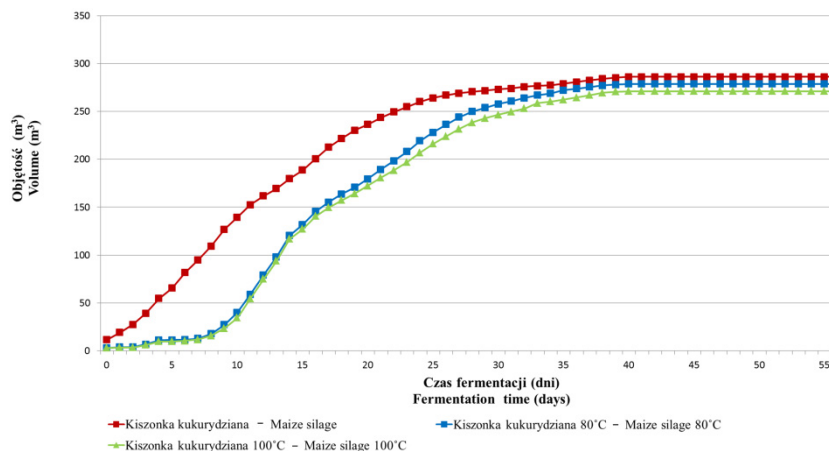
Kolejne rysunki – 4 i 5 – ukazują skumulowaną produkcję biogazu i metanu bez obróbki termicznej oraz po jej zastosowaniu – w odniesieniu do suchej masy organicznej zawartej w mieszaninie biogazowej.

W przypadku procesu fermentacji metanowej kiszonki z kukurydzy bez etapu obróbki termicznej ilość biogazu (rys. 2 i 4) oraz zawartość metanu w biogazie (rys. 3 i 5)



Rys. 2. Skumulowana produkcja biogazu w zależności od zastosowanej obróbki termicznej w czasie fermentacji metanowej ( $m^3/t$  s.m.)

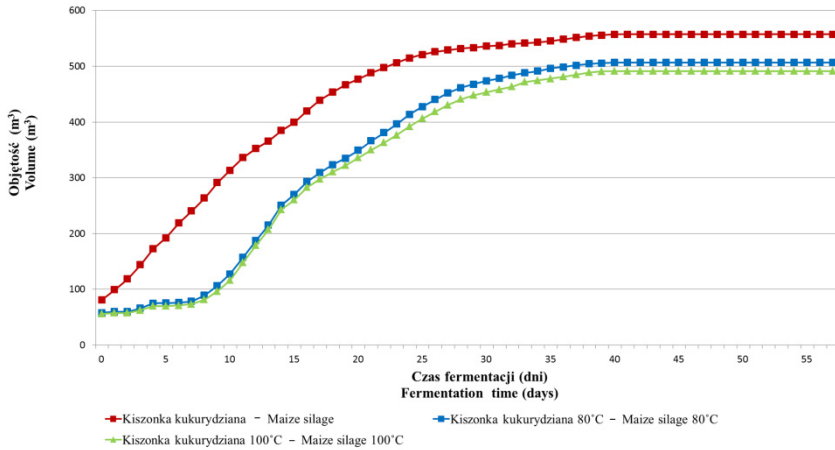
Fig. 2. Cumulative biogas production depending on the heat treatment during anaerobic digestion ( $m^3/t$  d.m.)



Rys. 3. Skumulowana produkcja metanu w zależności od zastosowanej obróbki termicznej w czasie fermentacji metanowej ( $m^3/t$  s.m.)

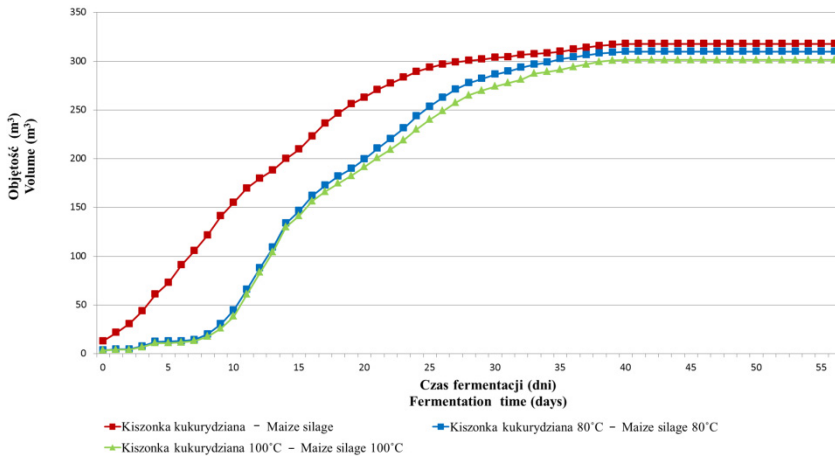
Fig. 3. Cumulative methane production depending on the heat treatment during anaerobic digestion ( $m^3/t$  d.m.)

osiągnęły wartości największe (280-560  $m^3$  po 40 dniach). Uzyskano relatywnie duże zawartości metanu w biogazie: 56% w odniesieniu do suchej masy w mieszaninie i 61% w stosunku do suchej masy organicznej. Najmniejsze ilości biogazu otrzymano z kisonki z kukurydzy poddanej obróbce termicznej w temperaturze 100°C pod ciśnieniem 0,1 MPa (260-490  $m^3$ , krzywe zielone), nieco większe – w procesie z ogrzewaniem substratu



Rys. 4. Skumulowana produkcja biogazu w zależności od zastosowanej obróbki termicznej w czasie fermentacji metanowej (m<sup>3</sup>/t s.m.o.)

Fig. 4. Cumulative biogas production depending on the heat treatment during anaerobic digestion (m<sup>3</sup>/t o.d.m.)



Rys. 5. Skumulowana produkcja metanu w zależności od zastosowanej obróbki termicznej w czasie fermentacji metanowej (m<sup>3</sup>/t s.m.o.)

Fig. 5. Cumulative methane production depending on the heat treatment during anaerobic digestion (m<sup>3</sup>/t o.d.m.)

w temperaturze 80°C (260-510 m<sup>3</sup>, krzywe niebieskie). Są to wartości mniejsze w porównaniu z rezultatami fermentacji prowadzonej w sposób tradycyjny. W wykonanym doświadczeniu zarejestrowano zatem negatywny wpływ termicznego *pre-treatmentu*. Uzyskane wyniki tłumaczy się efektem karmelizacji lignocelulozy zawartej w materiale poddawany obróbce termicznej (Kroh, 1994), która w doświadczeniu miała miejsce



zarówno podczas ogrzewania w warunkach ciśnienia atmosferycznego, jak i w autoklawie. Pochodzące z rozkładu celulozy, a następnie glukozy związki inhibitujące w postaci hydroksymetylofurfuralu oraz furfuralu zakłóciły przebieg fermentacji wskutek gwałtownego zmniejszenia wartości pH poniżej 6,8 w czasie pierwszych ośmiu dni trwania procesu (uwalnianie jonów  $H^+$  podczas rozkładu). Dodatkowo zmiana właściwości chemicznych biomasy spowodowała znaczne zmniejszenie jej wydajności biogazowej (Ajandouz i in., 2008; Quintas i in., 2007). Ze względu na dynamiczny przebieg obróbki termicznej zaleca się podawanie substratu do biofermentora w sposób sukcesywny, czego nie uczyniono w doświadczeniu. Doniesienia literaturowe potwierdzają, że zastosowanie obróbki termicznej substratów w procesie fermentacji metanowej może wywołać różny skutek: korzystny lub, jak w przypadku przedstawionych badań, negatywny. Przykładowo Edström i in. (2003), dokonując oceny wydajności biogazowej pasteryzowanej ( $70^{\circ}C$ , 1 h) i niepasteryzowanej mieszanki produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, odnotowali aż czterokrotny wzrost uzysku biogazu z ogrzewanej mieszaniny. W innych badaniach (Cuetos i in., 2010) w rezultacie zastosowania podwyższonej temperatury ( $133^{\circ}C$ ) nastąpiło gwałtowne zahamowanie fermentacji metanowej odpadów poubojowych (ang. *slaughterhouse waste*, SHW) w wyniku bardzo dużej akumulacji amoniaku pochodzącego z rozkładu białek, jak również wskutek utworzenia dodatkowych związków opornych na fermentację. Efekty obróbki cieplnej bywają zatem różne. Kluczowymi aspektami są rodzaj i ilość substratów poddawanych obróbce termicznej, a także wysokość zastosowanej temperatury. Ze względu na potwierdzone dowody korzystnego działania cieplnego *pre-treatmentu* w procesie fermentacji beztlenowej (wzrost wydajności biogazowej) i jego ogromne znaczenie praktyczne podjęte prace badawcze będą kontynuowane.

## Wnioski

1. Kiszonka z kukurydzy poddana obróbce termicznej ulega procesowi fermentacji o zmniejszonej wydajności ze względu na zachodzący podczas ogrzewania niekorzystny proces karmelizacji celulozy, wchodzącej w skład biomasy.

2. Zawartość metanu w próbkach poddanych obróbce termicznej była mniejsza niż w wyniku obróbki tradycyjnej z uwagi na zakłócenia procesu fermentacji poprzez zmniejszenie wartości pH wskutek degradacji hydroksymetylofurfuralu do furfuralu.

3. Zakłócenia przebiegu fermentacji metanowej, wynikające z karmelizacji materiału poddanego obróbce termicznej, mogą powodować radykalne spowolnienie lub zatrzymanie procesu. Zaleca się sukcesywną aplikację wsadu do biofermentora.

4. Wykorzystanie ciepła odpadowego pochodzącego z procesu fermentacji ma wielorakie znaczenie. Istotnym celem obróbki termicznej jest modyfikacja substratu, szczególnie biomasy lignocelulozowej, która ułatwi jej rozkład przez mikroorganizmy.

## Literatura

- Ahring, B. K. (2003). Perspectives for anaerobic digestion. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.*, 81, 1–30.
- Ajandouz, E. H., Desseaux, V., Tazi, S., Puigserver, A. (2008). Effects of temperature and pH on the kinetics of caramelisation, protein cross-linking and Maillard reactions in aqueous model systems. *Food Chem.*, 107, 1244–1252.
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zolisch, W., Mayer, K., Gruber, L. (2007). Biogas production from maize and dairy cattle manure – influence of biomass composition on the methane yield. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 118, 173–182.
- Battimelli, A., Carrère, H., Delgenès, J.-P. (2009). Saponification of fatty slaughterhouse wastes for enhancing anaerobic biodegradability. *Bioresour. Technol.*, 100, 15, 3695–3700.
- Bobleter, O. (1994). Hydrothermal degradation of polymers derived from plants. *Prog. Polym. Sci.*, 19, 797–841.
- Carlsson, M., Lagerkvist, A., Morgan-Sagastume, F. (2012). The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: a review. *Waste Manage.*, 32, 1634–1650.
- Cuetos, M. J., Gómez, X., Otero, M., Morán, A. (2010). Anaerobic digestion and co-digestion of slaughterhouse waste (SHW): influence of heat and pressure pre-treatment in biogas yield. *Waste Manage.*, 30, 1780–1789.
- Dinamarca, S., Aroca, G., Chamy, R., Guerrero, L. (2003). The influence of pH in the hydrolytic stage of anaerobic digestion of the organic fraction of urban solid waste. *Water Sci. Technol.*, 48, 249–254.
- DIN 38 414, 1985. (1985). Bestimmung des Faulverhaltens „Schlamm und Sedimente“. Berlin: Beuth.
- Edström, M., Nordberg, A., Thyseliusz, L. (2003). Anaerobic treatment of animal by products from slaughterhouses at laboratory and pilot scale. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 109, 127–138.
- Fengel, D., Wegener, G. (1994). *Wood chemistry, ultrastructure and reactions*. Berlin: De Gruyter.
- Hendriks, A. T. W. M., Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol.*, 100, 1, 10–18.
- Izumi, K., Okishio, Y. K., Nagao, N., Niwa, C., Yamamoto, S., Toda, T. (2010). Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste. *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 64, 601–608.
- Jastrzębska, G. (2007). *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*. Warszawa: WNT.
- Kepp, U., Machenbach, I., Weisz, N., Solheim, E. (2000). Enhanced stabilisation of sewage sludge through thermal hydrolysis – three years of experience with full scale plant. *Water Sci. Technol.*, 42, 89–96.
- Kroh, L. W. (1994). Caramelisation in food and beverages. *Food Chem.*, 51, 373–379.
- Michalska, K., Miazek, K., Krzystek, L., Ledakowicz, S. (2010). Hydroliza materiału roślinnego z gatunku *Miscanthus giganteus* pod wpływem termochemicznej obróbki. *Inż. Apar. Chem.*, 4, 50–51.
- Nizami, A. S., Korres, N. E., Murphy, J. D. (2009). Review of the integrated process for the production of grass biomethane. *Environ. Sci. Technol.*, 43, 8496–8508.
- Pilarski, K., Dach, J., Mioduszevska, N. (2010). Comparison of efficiency of methane production from liquid muck and dung. *J. Res. Appl. Agric. Eng.*, 55, 78–81.
- Pilli, S., Bhunia, P., Yan, S., Leblanc, R. J., Tyagi, R. D., Surampalli, R. Y. (2011). Ultrasonic pretreatment of sludge: a review. *Ultrason. Sonochem.*, 18, 1–18.
- Quintas, M., Guimarães, C., Baylina, J., Brandão, T. R. S., Silva, C. L. M. (2007). Multiresponse modelling of the caramelisation reaction. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 8, 306–315.

Pilarska, A., Pilarski, K., Witaszek, K., Dukiewicz, H., Dobrzański, K. (2015). Wstępne badania wpływu obróbki termicznej kiszonki z kukurydzy na wydajność biogazową. *Nauka Przyr. Technol.*, 9, 2, #18. DOI: 10.17306/J.NPT.2015.2.18

---

- Sahlström, L., Bagge, E., Emmoth, E., Holmqvist, A., Danielsson-Tham, M.-L., Albiñ, A. (2008). A laboratory study of survival of selected microorganisms after heat treatment of biowaste used in biogas plants. *Bioresour. Technol.*, 99, 16, 7859–7865.
- Vavilin, V. A., Fernandez, B., Palatsi, J., Flotats, X. (2008). Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: an overview. *Waste Manage.*, 28, 939–951.
- Zhang, B., Shahbazi, A. (2011). Recent developments in pretreatment technologies for production of lignocellulosic biofuels. *J. Pet. Environ. Biotechnol.*, 2, 1–8.

## PRELIMINARY RESEARCH ON THE EFFECT OF THERMAL TREATMENT OF MAIZE SILAGE ON BIOGAS PRODUCTION

**Summary.** The efficiency of the methane fermentation is affected by the type of substrates used and the rate of the process, which is mainly conditioned by the dynamics of hydrolysis – the first fermentation step. In order to improve the decay of hardly biodegradable material (in the literature called lignocellulosic biomass), pre-treatment of substrates is often applied: heat treatment, chemical treatment, mechanical treatment and other. In this research the heat treatment was carried out, with use of waste heat from the methane fermentation process, which is a difficult material to be stored. The idea of using heat from methane fermentation is an innovative solution with significant economic and ecological aspect. The purpose of this work is to examine the effect of heat treatment on biogas efficiency. The research was carried out on one of the most common biogas substrates, maize silage, which was heated on a steam at 80°C and then heat treated at 100°C.

**Key words:** methane fermentation, biomass, biogas efficiency, pre-treatment of substrates, waste heat

*Adres do korespondencji – Corresponding address:*

*Agnieszka Pilarska, Instytut Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Wojska Polskiego 31/33, 60-624 Poznań, Poland, e-mail: pilarska@up.poznan.pl*

*Zaakceptowano do opublikowania – Accepted for publication:*

*3.12.2014*

*Do cytowania – For citation:*

*Pilarska, A., Pilarski, K., Witaszek, K., Dukiewicz, H., Dobrzański, K. (2015). Wstępne badania wpływu obróbki termicznej kiszonki z kukurydzy na wydajność biogazową. Nauka Przyr. Technol., 9, 2, #18. DOI: 10.17306/J.NPT.2015.2.18*