

STAN WIEDZY ODNOŚNIE MODELOWANIA PROCESÓW FERMENTACJI ANAEROBOWEJ

Rafał Mulka, Józef Szlachta
Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. Obecnie wiele zjawisk bądź procesów zachodzących w przyrodzie opisuje się za pomocą modeli matematycznych, które pomagają zrozumieć dane zjawisko, jak i również umożliwiają sprawdzenie rezultatów danego procesu, bez konieczności przeprowadzania czasem bardzo kosztownych badań. W przypadku biogazowni rolniczych, w których zachodzi wiele różnych procesów (np. hydroliza, metanogeneza, octanogeneza), powstało wiele kalkulatorów biogazowych i zostało opracowanych wiele modeli matematycznych o zróżnicowanym poziomie kompleksowości ujęcia procesu fermentacji. Celem pracy było dokonanie dogłębnej analizy opracowanych i znanych w literaturze modeli matematycznych pod względem doboru parametrów determinujących produkcję metanu, a także sposobu oszacowania tej produkcji.

Słowa kluczowe: fermentacja beztlenowa, kalkulatory biogazowe, modele matematyczne, metan

Wstęp

Modelowanie procesów fermentacji beztlenowej umożliwia znalezienie odpowiedzi na pytania dotyczące przebiegu procesu powstawania metanu i tego, jakie parametry fizykochemiczne determinują proces. Do tej pory zostało opracowanych kilkanaście modeli, poczynając od tych najprostszych, gdzie występuje jeden czynnik sterujący, do bardziej skomplikowanych – opartych na wielu parametrach sterujących.

Oprócz dogłębnej analizy procesu, modelowanie umożliwia zwiększenie efektywności uzysku biogazu i przewidywania z jak największą precyzją rezultatów, co przyczynia się też do wzrostu zainteresowania modelami matematycznymi, opisującymi zjawiska fermentacji i hydrolizy. Mając do dyspozycji program oparty na modelu obliczającym uzysk biogazu z mieszaniny fermentacyjnej, można wykonać badania, nie wprowadzając fizycznie substratu do zbiorników, co oszczędziłoby czas i pieniądze. Jednocześnie ogromna złożoność całego procesu powoduje bardzo duże trudności w wykonaniu tego przedsięwzięcia. Nie bez znaczenia jest także sposób wykorzystania substratu w biogazowni, jak i również zastosowana technologia do produkcji metanu oraz wiele innych czynników.

Najtrudniejszą przeszkodą, z punktu widzenia opisującego proces, są oczywiście mikroorganizmy i środowisko, w jakim one się znajdują. W zasadzie każda roślina, każdy substrat jest inny. Dla przykładu kukurydza uprawiana na północy Polski, w związku z uprawianymi odmianami, nawożeniem oraz zróżnicowanym okresem wegetacji, będzie różniła się od tej uprawianej na południu. Odmiennosc środowiska substratowego powoduje zróżnicowanie mikroorganizmów, co sprawia, że produkcja biogazu staje się nieprzewidywalna. To, co dla ludzi może wydawać się nieszkodliwe, dla określonego gatunku bakterii może stać się trucizną (mamy wtedy do czynienia z inhibitorem). Równocześnie powoduje to, że projektowanie instalacji biogazowych bardzo często jest złożone i wymaga kompleksowego spojrzenia na produkcję biogazu. Spowodowane jest to brakiem wiedzy odnośnie zakłóceń występujących w biogazowniach rolniczych (Głuszczka i in., 2010).

Kalkulatory biogazowe

Alternatywą dla pisania modeli są tzw. kalkulatory biogazowe, które można znaleźć w Internecie. Służą one do obliczania uzysku biogazu z pojedynczych lub zmieszanych substratów. Zazwyczaj posiadają bogatą bazę danych różnych substratów i ich właściwości. Poza tym niektóre umożliwiają wyznaczanie większej ilości parametrów, jak moc, produkcja metanu, obciążenie objętościowe, niż niektóre modele matematyczne (Myczko i in., 2010). Po wypełnieniu kilku (czasem jednego pola) pól można obliczyć sumę produkcji biogazu z danej ilości substratu. Niestety kalkulatory nie umożliwiają wglądu, co się dzieje w danym czasie produkcji i jak dane parametry fizyko-chemiczne wpływają na produkcję np. metanu. Opierają się najczęściej na iloczynie suchej masy, suchej masy organicznej, ilości substratu, potencjalnej produkcji biogazu z substratu i czasem zawartości procentowej metanu w wyprodukowanym biogazie. Wszystkie te parametry wyznaczone są na podstawie badań. Pozostałe czynniki, takie jak temperatura, pH, czas generacji mikroorganizmów itd., nie są brane pod uwagę. Również nie zostaje wyodrębniony żaden parametr, który decyduje o przebiegu procesu w sposób determinujący. W zasadzie kalkulatory są przede wszystkim znacznym uproszczeniem problemu fermentacji. Umożliwiają jedynie wyznaczenie ostatecznej ilości metanu, biogazu, jaka powstanie w procesie fermentacji. Nie pozwalają natomiast na przeprowadzenie dokładnej analizy, przy pomocy której można by np. sprawdzić ilość produkowanego biogazu (jego skład) w czasie. (Sławiński i in., 2012).

Modele matematyczne

Modelowanie procesów zachodzących w biogazowniach rolniczych to przede wszystkim dogłębna analiza i poszukiwanie czynników determinujących przebieg powstawania biogazu. Po wyodrębnieniu istotnych parametrów następuje proces opisywania zjawiska przy pomocy równań matematycznych. W związku z tym model, w przeciwieństwie do przedstawionych wcześniej kalkulatorów biogazowych, jest oparty na bardzo wielu założeniach (czasem jednym), ale bardzo mocno determinujących przebieg procesów, co umożliwia dokładniejszą analizę wpływu danych parametrów na końcowy rezultat powstawania biogazu. Jednocześnie model matematyczny jest bardzo często o wiele bardziej skomplikowany.

Poniżej w ujęciu chronologicznym zostaną krótko omówione modele matematyczne, zróżnicowane pod względem czynników wpływających na produkcję biogazu, jakie zostały znalezione w dostępnej literaturze.

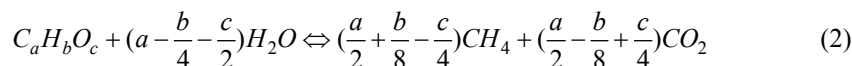
W 1825 roku Benjamin Gompertz wyprowadził równanie umożliwiające obliczenie intensywności umieralności. Następnie zastosowano to równanie w prawie Makehama-Gompertza, które opisuje dynamikę śmiertelności populacji. Oprócz tego powyższa funkcja wykorzystywana jest w biologii, w medycynie (do opisu np. wzrostu nowotworów). Poza tym przy pomocy zmodyfikowanego równania Gompertza można obliczyć produkcję biogazu bądź też metanu (1) (Ledakowicz i in., 2010).

$$M = P \cdot e^{-\frac{R_m \cdot e}{P}[\lambda - t] + 1} \quad (1)$$

gdzie:

- M – całkowita produkcja metanu (l),
- P – potencjalna produkcja metanu (l),
- R_m – maksymalna produkcja (l·dzień⁻¹),
- λ – czas trwania fazy opóźnienia (dni),
- t – dzień eksperymentu (dni),
- e – liczba Eulera 2,71

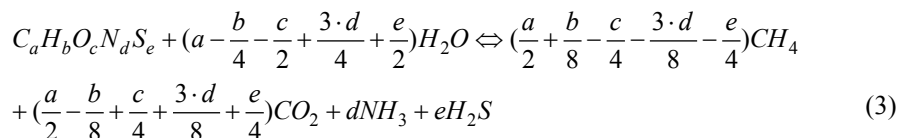
W 1962 Buswell i Mueller stworzyli wspólnie model obliczający uzysk metanu w oparciu o skład chemiczny odpadów (2). Oprócz tego model oblicza także ilość dwutlenku węgla, który powstaje w procesie. Niestety model nie uwzględnia wpływu bardzo ważnych parametrów, takich jak temperatura, pH, czy czas generacji mikroorganizmów (Gerber, 2008).



gdzie:

- $C_a H_b O_c$ – masa organiczna,
- $H_2 O$ – woda,
- CO_2 – dwutlenek węgla,
- CH_4 – metan,
- a, b, c – ilość poszczególnych cząsteczek.

W 1976 Boyle zmodyfikował model Buswell i Mueller dodając do równania zawartość azotu i siarki. Niestety poza składem chemicznym model nie uwzględnia innych parametrów (Gerber, 2008).



gdzie:

- $C_a H_b O_c N_d S_e$ – masa organiczna,
- H_2O – woda,
- CO_2 – dwutlenek węgla,
- CH_4 – metan,
- NH_3 – amoniak,
- H_2S – siarkowodór,
- a, b, c, d, e – ilość poszczególnych cząsteczek.

W 1978 Jewell stworzył empiryczny model obliczający produkcję biogazu w oparciu o funkcje degradacji biomasy w trybie produkcji ciągłej (substrat dostarczany jest kilka razy na dobę). Równanie uwzględnia przepływ ulegającej biodegradacji suchej masy i głównie na jej podstawie dokonuje obliczeń produkcji biogazu na dzień (Minott, 2002):

$$BG_{methane} = \frac{0.5(S_{b0} - S_{b1})}{HRT} \quad (4)$$

gdzie:

- $BG_{methane}$ – objętościowa produkcja biogazu na dzień. (objętość gazu wytworzonego na objętość komory fermentacyjnej dziennie) ($L \cdot (L \cdot dzień)^{-1}$),
- S_{b0} – dopływ ulegającej biodegradacji suchej masy organicznej ($g \cdot L^{-1}$),
- S_{b1} – odpływ ulegającej biodegradacji suchej masy organicznej ($g \cdot L^{-1}$),
- HRT – hydrauliczny czas retencji (dni).

Również w 1978 Chen i Hashimoto napisali empiryczny model przewidujący uzysk metanu (5). Hashimoto uwzględnił tempo rozwoju mikroorganizmów, które uzależnił od temperatury gnojowicy w komorze fermentacyjnej i empirycznie wyznaczonych współczynników. Poza tym został wyprowadzony bezwymiarowy współczynnik 'K' opisujący wpływ stężenia suchej masy organicznej na produkcję biogazu. (Axaopoulos i in., 2000).

$$\gamma_v = \frac{B_0 \cdot S_0}{HRT} \left(1 - \frac{K}{\mu_m \cdot HRT - 1 + K}\right) \quad (5)$$

gdzie:

- γ_v – produkcja metanu (objętość metanu wytworzonego na objętość komory fermentacyjnej, dziennie) ($L CH_4 \cdot (L \cdot dzień)^{-1}$),
- B_0 – najwyższa możliwa produkcja biogazu ($L \cdot (g \cdot s.m.o)^{-1}$),
- S_0 – stężenie dopływającej suchej masy organicznej ($g \cdot L^{-1}$),
- μ_m – tempo rozwoju bakterii ($dzień^{-1}$),
- K – współczynnik bezwymiarowy,
- HRT – hydrauliczny czas retencji (dni).

Równanie opisujące tempo rozwoju bakterii stworzone w 1981 i współczynnik K opracowany w 1984 przez Hashimoto:

$$\mu_m = 0,013T - 0,129 \quad (6)$$

gdzie:

T – temperatura gnojowicy w komorze fermentacyjnej (od 20°C do 60°C)

$$K = 06 + 0,0206e^{(0,051 \cdot S_0)} \quad (7)$$

gdzie:

S_0 – dopływ suchej masy organicznej ($g \cdot L^{-1}$).

W 1992 Safely i Westerman znaleźli związek pomiędzy produkcją metanu, a temperaturą wsadu znajdującego się na dnie komory fermentacyjnej. Następnie napisali krótkie równanie (8): (Binxin i in., 2006):

$$B = 0,216 + 0,00934 \cdot T \quad (8)$$

gdzie:

B – produkcja metanu na kilogram suchej masy organicznej ($m^3 \cdot (kg \cdot s \cdot m \cdot o)^{-1}$),

T – temperatura substratu (gnojowicy) (°C).

W 1994 został opracowany model służący do obliczania produkcji metanu dla zakresu mezofilnego przez Tabasarana. W celu wyznaczenia produkowanego strumienia generowanego biogazu wykorzystał on kinetykę rozkładu materii organicznej i na podstawie uzyskanych wyników opracował model wykorzystujący dwa parametry, które determinowały uzysk biogazu. Pierwszym parametrem jest zawartość węgla w złożu odpadów. Natomiast drugim czynnikiem jest temperatura (Wandrasz i in., 2002).

$$G = 187C_{org}(0,014(T - 273) + 0,28) \quad (9)$$

gdzie:

C_{org} – zawartość węgla organicznego w odpadach ($kg \cdot C_{org} \cdot t^{-1}$),

T – temperatura w złożu odpadów (K),

G – potencjalna produkcja biogazu z odpadów ($m^3 \cdot t^{-1}$)

$$G_t = G(1 - 10^{-k}) \quad 10$$

gdzie:

G_t – produkcja biogazu na jednostkę odpadów ($m^3 \cdot t^{-1}$),

k – współczynnik szybkości reakcji (a^{-1}).

$$k = -\log 0,5 \quad (11)$$

W 1995 Toprak opracował krótki model matematyczny, pozwalający obliczyć produkcję metanu z danej powierzchni substratu na podstawie empirycznego współczynnika i temperatury otaczającego powietrza (Toprak, 1995):

$$R = 1,241(T_a)^{1,127} \quad (12)$$

gdzie:

- R – dzienna produkcja biogazu z danej powierzchni ($L \cdot (m^2 \cdot \text{dzień}^{-1})$),
 T_a – temperatura otaczającego powietrza ($^{\circ}C$).

W 1999 Hobbs opracował model przewidujący emisję metanu i dwutlenku węgla z gnojowicy świńskiej w funkcji retencji czasu. Model nie uwzględnia żadnych innych czynników, przez co nie może zostać wykorzystany do głębszej analizy czy obliczania produkcji metanu dla innych substratów (Binxin i in., 2006):

$$CH_4 = 05t^2 + 0,0266t - 1,04 \quad (13)$$

gdzie:

- t – czas retencji (h),
 CH_4 – masowa emisja metanu (mg).

W 1999 Andara i Esteban opracowali dwustopniowy model kinetyczny, za pomocą którego można wyznaczyć produkcję metanu z gnojowicy świńskiej. Model uwzględnia znacznie więcej czynników, takich jak koncentrację mikroorganizmów, czas retencji czy stałą komórkową wydajność. Doświadczenia wykazały niewielki błąd w próbach obliczeniowych produkcji biogazu za pomocą tej metody obliczeniowej (Andara i in., 1999):

$$\frac{B}{B_0} = \left(\frac{X_0}{(Y \cdot S_0)e^{(\mu t)}} \right) \quad (14)$$

I

$$\frac{(B_0 - B)}{B_0} = e^{(-kt)} \quad (15)$$

gdzie:

- B – produkcja metanu na kilogram gnojowicy ($m^3 \cdot kg^{-1}$),
 B_0 – określona produkcja metanu w nieskończonym hydraulicznym czasie utrzymania ($m^3 \cdot kg^{-1}$),
 X_0 – początkowa koncentracja mikroorganizmów ($g \cdot L^{-1}$),
 Y – stała komórkowa wydajność (wartość bezwymiarowa),
 S_0 – początkowe stężenie substratu ($g \cdot L^{-1}$),
 μ – bakteryjne tempo wzrostu (dni^{-1}),
 t – czas (dni),
 k – kinetyczny współczynnik (dni^{-1}).

W 2000 Masse i Droste przeanalizowali procesy trawienia w warunkach anaerobowych i na podstawie wyciągniętych wniosków opracowali matematyczny model opisujący to zjawisko w procesie rozkładu substratu w reaktorze. Badania te wprowadziły pojęcie biologicznej aktywności. Niestety w równaniu nie została uwzględniona temperatura panująca w komorze fermentacyjnej, co umożliwiłoby głębszą analizę (Masse i in., 1999).

$$Q_{CH_4} = V_{TP} V_L (\sum p_i)_{Bio} \quad (16)$$

gdzie:

- Q_{CH_4} – objętościowy przepływ metanu ($L \cdot d^{-1}$),
- V_{TP} – objętość jednego mola gazu ($L \cdot mol^{-1}$),
- V_L – objętość płynu w reaktorze (L),
- $(\sum p_i)_{Bio}$ – zmiany produkcji metanu spowodowane przez aktywność biologiczną ($g \cdot d^{-1}$).

Równanie opracowane przez Scott i Minott (2002) jest najbardziej rozbudowane i uwzględnia największą ilość czynników determinujących proces produkcji biogazu spośród wymienionych modeli matematycznych. Za pomocą tego równania można, oprócz produkcji biogazu, obliczyć również całkowitą degradację podłoża. Model wykorzystuje równanie zaczerpnięte z modelu Hashimoto umożliwiające opisanie tempa wzrostu mikroorganizmów. Model został zweryfikowany licznymi doświadczeniami i rezultaty były bardzo dobre. Wyniki w dużym procencie pokrywały się z tymi uzyskanymi doświadczalnie (Binxin i in., 2006):

$$BG = \frac{0,5}{HRT} [C_0 - C_T(x, t)] \cdot V \cdot \frac{T_a}{T_0} \quad (17)$$

gdzie:

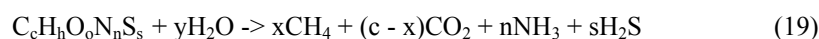
- BG – produkcja biogazu na dzień ($kg \cdot dni^{-1}$),
- HRT – hydrauliczny czas retencji (dni),
- C_0 – dopływ suchej masy organicznej ($C_0 = 0,863 \cdot s.m$), ($kg \cdot m^{-3}$),
- $C_t(x, t)$ – całkowita degradacja podłoża w komorze fermentacyjnej ($kg \cdot m^{-3}$),
- V – pojemność komory fermentacyjnej (m^3),
- T_0 – stała temperatura, przy której mogą zachodzić prawidłowe procesy rozkładu substratu w komorze fermentacyjnej (K),
- T_a – 273,2 (K).

$$C_t(x, t) = \frac{C_0 \cdot K \cdot e^{(-1/k)}}{\mu_m^2 \cdot V \cdot t} \{ (V \cdot \mu_m - 2 \cdot v \cdot k) [1 - e^{(-\mu_m \cdot t/k)}] + t \cdot v \cdot \mu_m [1 + e^{(-\mu_m \cdot t/k)}] \} \quad (18)$$

gdzie:

- v – dzienny przepływ gnojowicy do komory fermentacyjnej ($m^3 \cdot d^{-1}$),
- t – maksymalny hydrauliczny czas retencji dla rozkładu w określonym punkcie (dni),
- C_0 – ilość suchej masy organicznej ($kg \cdot m^{-3}$),
- C_t – całkowita degradacja podłoża,
- V – pojemność komory fermentacyjnej (m^3),
- K – kinetyczny parametr obliczony eksperymentalnie na podstawie równania wprowadzonego przez Hashimoto. Wartość stała – 1,26:
- μ_m – rozwój bakterii (na dzień) na podstawie wzoru (6) (Hashimoto 1981).

Deublein i Steinhäuser opracowali w 2008 równanie umożliwiające oszacowanie potencjalnej produkcji biogazu przy założeniu, że jest znany chemiczny skład substratu (równocześnie model umożliwia obliczenie, ile powstanie siarkowodoru i amoniaku) (Sattler, 2011):

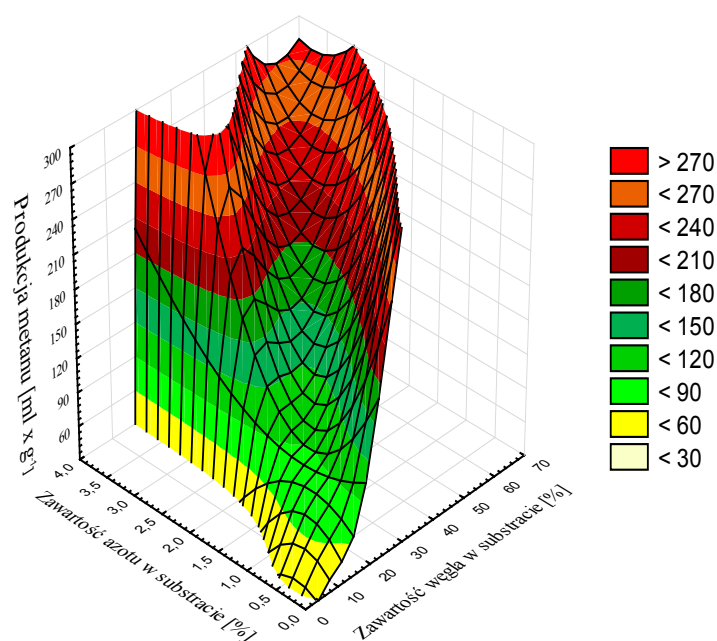


$$x = \frac{1}{8} \cdot (4c + h - 20 - 3n - 2s) \quad (20)$$

$$y = \frac{1}{4} \cdot (4c - h - 20 + 3n + 3s) \quad (21)$$

Wpływ zawartości węgla w substracie na produkcję CH₄

Tylko w trzech modelach spośród przedstawionych modeli (model Buswell i Mueller, Boyle, Deublein i Steinhäuser) został uwzględniony skład chemiczny substratu. Natomiast w żadnym z modeli nie uwzględniono zawartości węgla w substracie, a pierwiastek ten decyduje determinująco o ilości powstającego metanu. Jeżeli w substracie będzie niewielka zawartość węgla, to nawet w najbardziej sprzyjających warunkach (temperatura, pH itd.) nie powstanie duża ilość metanu. Na rysunku 1. został przedstawiony wpływ zawartości węgla i azotu na produkcję metanu, gdzie wraz ze wzrostem zawartości węgla w substratach rosła produkcja metanu.



Rysunek 1. Wpływ zawartości węgla na produkcję metanu
Figure 1. Impact of coal content on methane production

Kolejnym bardzo istotnym elementem jest zawartość nierozkładalnych związków, takich jak lignina, która nie rozkłada się podczas etapu hydrolizy, ponieważ istnieje niewiele mikroorganizmów, takich jak np. grzyby (Kancelista i in., 2008), które potrafią rozłożyć ligninę. W przedstawionych modelach cecha ta została uwzględniona tylko w modelu Jewell jako sucha masa organiczna ulegająca biodegradacji. Pozostałe modele matematyczne nie uwzględniają nierozkładalnych substancji, których archeony nie przetwarzają na metan, co przekłada się na zwiększony błąd popełniany podczas szacowania potencjalnej produkcji metanu.

Podsumowanie

Modelowanie procesów zachodzących w biogazowniach rolniczych wymaga spojrzenia z szerszej perspektywy na przebieg procesu i uwzględnienia przede wszystkim najważniejszych parametrów, takich jak zawartość suchej masy w substracie, następnie zawartości węgla i substancji nierozkładalnych (lignina, popiół). Informacje te umożliwiają ustalenie maksymalnej produkcji metanu przy założeniu, że pozostałe czynniki są ustalone korzystnie dla przebiegu biochemicznego rozkładu substratu. Dopiero wtedy można oszacowywać produkcję metanu na podstawie pozostałych parametrów (jak np. temperatura, zawartość azotu).

Równocześnie należy podkreślić, że opracowanie uniwersalnego modelu, który by obejmował wszystkie substraty, jest niemożliwe ze względu na dużą ilość pierwiastków znajdujących się w substratach i ich zróżnicowany wpływ na przebieg procesu fermentacji anaerobowej. Stąd też konieczne jest pogrupowanie substratów najbardziej zbliżonych do siebie z jednoczesnym uwzględnieniem inokulum, które również wpływa na produkcję metanu.

Literatura

- Andara, A.; Rodriguez, Esteban J.M. Lomas (1999). *Kinetic study of the anaerobic digestion of the solid fraction of piggery slurries*. Departamento de Ingenieria Quimica y del Medio Ambiente, Pozyskano z: <http://www.sciencedirect.com>
- Axaopoulos, P.; Panagakis, P.; Tsavdaris, A.; Georgakakis, D. (2000). *Simulation and experimental performance of a solarheated anaerobic digester Agricultural University of Athens*. Agricultural Engineering Department, Laboratory of Farm Structures Pozyskano z: www.researchgate.net
- Binxin, Wu Eric; Bibeau, L.; Kifle, G. Gebremedhin (2006). *Three-Dimensional Numerical Simulation Model of Biogas Production for Anaerobic Digesters*. ASABE Annual International Meeting Sponsored by ASABE Oregon Convention Center Portland, Oregon. Pozyskano z: <http://elibrary.asabe.org>
- Kancelista, A.; Witkowska, D. (2008). *Biosynteza wybranych enzymów litycznych w podłżu zawierającym odpadowe kaczany kukurydziane przez grzyby strzępkowe z rodzaju trichoderma*. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu. Pozyskano z: www.aqua.ar.wroc.pl
- Gerber Mandy (2008). *An analysis of available mathematical models for anaerobic digestion of organic substances for production of biogas*. Pozyskano z: www.ruhr-uni-bochum.de
- Głaszczka, A.; Wardal, W.J; Romaniuk, W.; Domasiewicz, T. (2010). *Biogazownie Rolnicze*. Warszawa, MULTICO, ISBN: 978-83-7073-432-9.

- Masse, D. I.; Drost, R. L. (1999). *Comprehensive model of anaerobic digestion of swine manure slurry in a sequencing batch reactor*. Canada and Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Pozyskano z: <http://www.sciencedirect.com>
- Myczko, A.; Myczko, R.; Kołodziejczyk, T.; Golimowska, R.; Lenarczyk, J.; Janas, Z.; Kliber, A.; Karłowski, J.; Dolska, M. (2010). *Budowa i Eksploatacja Biogazowni Rolniczych*. Warszawa – Poznań, Pozyskano z: <http://www.bip.minrol.gov.pl>
- Ledakowicz, S.; Kacprzak, A.; Krzystek, L. (2010). *General characteristics and biochemical methane potentials (bmp) of various energy crops grown in Poland*. CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy. Pozyskano z: <http://www.iiasa.ac.at>
- Sattler, M. (2011). *Anaerobic Processes for Waste Treatment and Energy Generation*. University of Texas at Arlington United States. Pozyskano z: www.intechopen.com
- Sławiński, K.; Bujaczek, R.; Piskier, T. (2012). *Ocena przydatności kalkulatorów biogazowni przy planowaniu budowy biogazowni rolniczej*. Katedra Agrotechnologii, Katedra Biologicznych Podstaw Produkcji Rolniczej, Politechnika Koszalińska Pozyskano z: ir.ptir.org
- Minott S. J., (2002). *Feasibility of fuel cells for energy conversion on the dairy farm*. Cornell University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science. Pozyskano z: citeseerx.ist.psu.edu
- Toprak, H. (1995). *Temperature and organic loading dependency of methane and carbon dioxide emission rates of a full-scale anaerobic waste stabilization pond*. Pobrane z <http://www.sciencedirect.com>
- Wandrasz, J. W.; Landrat, M. (2002). *Model matematyczny wytwarzania biogazu w składowiskach odpadów*. Pobrane z: www.os.not.pl

STATE OF KNOWLEDGE CONCERNING MODELLING OF ANAEROBIC FERMENTATION PROCESSES

Abstrakt. Presently, many phenomena or processes taking place in the environment is described with the use of mathematical models, which help to understand a particular phenomena as well as enable verification of results of a given process without the necessity of carrying out sometimes very expensive research. In case of agricultural biogas plants, where numerous various processes take place (e.g. hydrolysis, methanogenesis, acetogenesis), many biogas calculators were produced and many mathematical models of a varied level of complexity of fermentation process perspectives were developed. The aim of the paper was to carry out thorough analysis of developed and known in the literature mathematical models on account of selection of parameters which determine methane production and the manner of assessing this production.

Key words: anaerobic fermentation, biogas calculators, mathematical models, methane

Adres do korespondencji:

Rafał Mulka; e-mail: rafal.mulka@up.wroc.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Chelmońskiego 37/41
51-630 Wrocław