

Praca zbiorowa
pod redakcją
Krzysztofa Piekonia i Magdaleny Bogackiej

Współczesne problemy energetyki II



2015

Praca zbiorowa pod redakcją
Krzysztofa Pikonia i Magdaleny Bogackiej

WSPÓŁCZESNE PROBLEMY ENERGETYKI II

GLIWICE 2015

WSPÓŁCZESNE PROBLEMY ENERGETYKI II

Redakcja naukowa: Krzysztof Pikoń, Magdalena Bogacka

Redakcja techniczna: Martyna Potempa, Barbara Dragon, Magdalena Baron, Anna Przybylska

Recenzenci:

dr hab. inż. Mohamed Alwaeli

dr inż. Lucyna Czarnowska

dr inż. Monika Czop

dr inż. Małgorzata Kajda-Szcześniak

dr hab. inż. Danuta Król

dr hab. inż. Tomasz Jaworski

dr. hab. inż. Krzysztof Pikoń

dr hab. inż. Wojciech Stanek

dr hab. inż. Sławomir Stelmach

dr inż. Karol Sztekler

dr inż. Waldemar Ścierański

dr hab. inż. Jarosław Zuwała

Wydawca:

Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska <http://awmep.org>

e-mail: ago@helion.pl

Published by Mastermedia sp. z o.o.

ISBN 978-83-937255-8-8

Copyright © Mastermedia 2015

Wydawca dołożył wszelkich starań, aby informacje zawarte w tej książce były kompletne i rzetelne. Nie bierze jednak żadnej odpowiedzialności za ich wykorzystanie, ani za związane z tym ewentualne naruszenie praw autorskich i patentowych.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentów niniejszej publikacji w jakiegokolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich niniejszej publikacji.

Spis treści

I.	Wykorzystanie gazów niskokalorycznych w ochronie środowiska i energetyce	7
1.	Wstęp	7
2.	Gazy niskokaloryczne.....	8
3.	Zgazowanie.....	8
4.	Reburning	9
5.	Badania eksperymentalne	10
6.	Porównanie wyników badań z danymi literaturowymi.....	12
7.	Podsumowanie i wnioski	13
II.	Kolektory słoneczne - energia XXI wieku.....	15
1.	Wstęp	15
2.	Solarotermia- pojęcia podstawowe	15
3.	Klasyfikacja kolektorów solarnych.....	15
4.	Materiały stosowane do produkcji kolektorów słonecznych	17
1.	Zastosowanie kolektorów słonecznych.....	19
5.	Rozwój technologii kolektorów słonecznych	20
6.	Kolektory słoneczne w Unii Europejskiej	20
7.	Rynek kolektorów słonecznych w Polsce w 2014r.....	21
8.	Efektywność ekonomiczna budowy kolektorów słonecznych.....	21
9.	Podsumowanie	21
III.	Emisja metanu podczas chowu zwierząt gospodarskich	23
1.	Wstęp	23
2.	Metodyka	24
3.	Wyniki badań i dyskusja.....	25
4.	Podsumowanie	28
IV.	Fermentacja metanowa kiszonki ze słomy kukurydzianej w warunkach mezo- i termofitowych	31
1.	Wstęp	31
2.	Materiały i metody.....	32
3.	Wyniki	34
4.	Wnioski.....	38
V.	Dwustopniowa fermentacja wodorowo-metanowa	41
1.	Wstęp	41
2.	Dwustopniowa fermentacja wodorowo-metanowa.....	42
3.	Podsumowanie	43
VI.	Analiza wrażliwości modelu numerycznego turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu	45

1.	Wstęp	45
2.	Model numeryczny turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu	46
3.	Wyniki	49
4.	Podsumowanie	52
VII.	Efektywność energetyczna płaskich i próżniowych kolektorów słonecznych	55
1.	Wstęp	55
2.	Cel i zakres pracy	57
3.	Metodyka i wyniki badań	57
4.	Podsumowanie i wnioski	58
VIII.	Odzysk ciepła z urządzenia do cięcia laserowego	61
1.	Wstęp	61
2.	Budowa i zasada działania instalacji	62
3.	Analiza ekonomiczna	62
4.	Podsumowanie	64
IX.	Analiza termodynamiczna układu turbiny gazowej zasilanej wodorem	65
1.	Wstęp	65
2.	Opis analizowanego układu turbiny gazowej	66
3.	Wpływ wybranych parametrów na działanie układu	67
4.	Podsumowanie	69
X.	Termiczne i biologiczne przekształcanie odpadów	71
1.	Wstęp	71
2.	Termiczne przekształcanie odpadów	71
3.	Biologiczne metody przetwarzania odpadów	74
4.	Podsumowanie	78
XI.	Analiza matematyczna efektywności procesów uzyskania biogazu z odpadów rolniczych	81
1.	Wstęp	81
2.	Analiza efektywności procesów a jej komputerowa realizacja	82
3.	Symulacja matematyczna	83
4.	Podsumowanie	89
XII.	Analiza właściwości paliwowych wybranych odpadów opakowaniowych	91
1.	Wstęp	91
2.	Bilans ilościowy tworzyw sztucznych	92
3.	Metodyka badań	93
4.	Wyniki Badań	93
5.	Podsumowanie	96
XIII.	Dodatki paliwowe dla paliw stałych	99
1.	Wstęp	99
2.	Działanie dodatków paliwowych	100

3.	Metodyka badań.....	100
4.	Wyniki badań.....	101
5.	Podsumowanie.....	105
6.	Wnioski.....	105
XIV.	Wpływ instalacji wychwytu i sprężania CO₂ wykorzystującej membranę separacyjną na charakterystyki termodynamiczne oraz ekonomiczne nadkrytycznej elektrowni węglowej	107
1.	Wstęp.....	107
2.	Blok referencyjny	108
3.	Moduł membrany separacyjnej.....	110
4.	Integracja bloku referencyjnego z instalacją CCS	110
5.	Analiza ekonomiczna.....	112
6.	Podsumowanie.....	114
XV.	Analiza rozkładu temperatury wzdłuż płyty rusztu wibracyjnego w technologii utylizacji biomasy oraz paliw z odpadów	116
1.	Wstęp.....	116
2.	Metodyka	118
3.	Analiza paliwa	120
4.	Opis badań	120
5.	Projekt wymaganej grubości izolacji	122
6.	Obliczenia cieplne komory paleniskowej	123
7.	Podsumowanie.....	126
XVI.	Zagospodarowanie ciepła odpadowego w nowoczesnym układzie gazowo - parowym z instalacją wychwytu i sprężania CO₂ poprzez siłownie ORC	128
1.	Wstęp.....	128
2.	Charakterystyka bloku gazowo - parowego.....	129
3.	Wyniki integracji bloku z siłowniami ORC.....	132
4.	Podsumowanie.....	134
XVII.	Wykorzystanie biogazu w energetyce rozproszonej	137
1.	Wstęp.....	137
2.	Ogólna charakterystyka biomasy i jej fermentacja metanowa.....	138
3.	Wpływ składu mieszanki wsadowej na jakość biogazu.....	141
4.	Energetyka rozproszona.....	141
5.	Ekonomiczne i ekologiczne aspekty wykorzystania biogazu	142
6.	Wykorzystanie biogazu (wybrane przykłady)	143
7.	Problematyka wytwarzania i wykorzystania biogazu do celów energetycznych [6]	145
8.	Podsumowanie.....	145
XVIII.	Współprądowe zgazowanie wtórnego paliwa odpadowego, biomasy oraz mieszanek paliwa wtórnego z biomasą.....	147
1.	Wstęp.....	147

2.	Układ eksperymentalny i metodyka badawcza	149
3.	Wyniki	150
4.	Podsumowanie i wnioski.	152
XIX.	Zastosowanie produktów z pirolizy zużytych opon	155
1.	Wstęp	155
2.	Proces pirolizy	156
3.	Podsumowanie	159

XI. Analiza matematyczna efektywności procesów uzyskania biogazu z odpadów rolniczych

Paweł Świsłowski¹, Antonina Kalinichenko²;

¹ student 2 roku, kierunek – odnawialne źródła energii, Uniwersytet Opolski

² prof. dr hab., Samodzielna Katedra Inżynierii Procesowej, Uniwersytet Opolski (Polska); Katedra Systemów Informacyjnych i Cybernetyki Ekonomicznej, Połtawska Państwowa Akademia Rolnicza (Ukraina), Samodzielna Katedra Inżynierii Procesowej, ul. Dmowskiego 7-9, 45-365 Opole, Poland, tel.: +48 77 401 67 00, email: akalinichenko@uni.opole.pl, spajo5@gmail.com

Streszczenie

Celem pracy badawczej było przeprowadzenie analizy dla imitacji i opracowania różnych trybów wykorzystania biogazowni rolniczej w niejednorodnych warunkach wejściowych. Przedstawiony model pozwala zoptymalizować procesy wytwarzania biogazu w zależności od rodzaju i ilości wsadu oraz zapotrzebowania na energię cieplną i elektryczną. Stworzenie takiego modelu jest niezwykle użyteczne na etapie projektowania biogazowni oraz przy podjęciu decyzji o opłacalności takiej inwestycji, wyeksponowaniu jej efektów ekologicznych w odniesieniu do energetyki niekonwencjonalnej.

Słowa kluczowe: biogazownia rolnicza, analiza matematyczna, biogaz, biomasa, odnawialne źródła energii, fermentacja

1. Wstęp

Odnawialne źródła energii (OZE) – źródło wykorzystujące w procesie przetwarzania energię wiatru, promieniowania słonecznego, aerotermalną, geotermalną, hydrotermalną, fal, prądów i pływów morskich, spadku rzek oraz energię pozyskiwaną z biomasy, biogazu pochodzącego ze składowisk odpadów, a także biogazu powstałego w procesach odprowadzania lub oczyszczania ścieków albo rozkładu składowanych szczątków roślinnych i zwierzęcych [1]. Tak brzmi definicja odnawialnych źródeł energii sformułowana przez Prawo Energetyczne. Wśród energetyki niekonwencjonalnej znajduje się również biogaz, który może przynosić wysokie korzyści z jego użytkowania.

Biogaz, inaczej nazywany gazem wysypiskowym, jest produktem beztlenowej fermentacji metanowej związków pochodzenia organicznego. Do tych należeć będą odpady komunalne pochodzenia biologicznego, ścieki, odpady przemysłu rolno-spożywczego, a także odchody (płynne lub stałe) zwierząt (obornik, gnojowica) [2]. Do związków pochodzenia organicznego zaliczyć można również biomasę ulegającą biodegradacji, z produkcji rolnej: substancje pochodzenia roślinnego i zwierzęcego, do których oprócz odchodów zwierząt, zaliczamy słomę i inne odpady produkcji rolniczej oraz odpady organiczne typu kiszonka kukurydzy, trawy. Tego rodzaju pozostałości zostały wyszczególnione ze względu na charakter procesów uzyskania biogazu z odpadów rolniczych.

Instalacją służącą do produkcji biogazu jest biogazownia. Są trzy rodzaje biogazowni: przy oczyszczalni ścieków, do składowania odpadów (przemysłowych, komunalnych) na wysypiskach oraz rolniczej, która stanowi podstawę tego modelu. Indywidualne gospodarstwa rolne oraz duże gospodarstwa hodowlane są źródłem niewykorzystanego energetycznie biogazu, za pomocą którego można poprawić bilans energetyczny danego gospodarstwa rolnego [3]. Z tą myślą powstała analiza komputerowa, która uwzględnia różne warunki, zmienne oraz substraty, pozwala udoskonalić ocenę opłacalności wytwarzania biogazu w biogazowni rolniczej.

Do tej pory powstało wiele rodzajów kalkulatorów [4-5], które pozwalają na wymodelowanie przyszłej efektywności i wydajności danej biogazowni. Jednak wadą tych wzorców jest ich niezmienny algorytm, którego nie można modyfikować, rozszerzać. Jest ograniczony do tych opcji, które zostały w niego wbudowane. Nie ma możliwości korekty bądź zmiany formuł, obliczeń czy też całego algorytmu. Użytkownik jest zdany na wybór,

który został zaprezentowany przez autorów, twórców, a czasem jest on bardzo ograniczony. Niemalże jest również opracowań, które w podobny sposób za pomocą wzorów i obliczeń przedstawiają tematykę modelowania wydajności biogazowni [6]. Niemniej jednak, sposób zaprezentowany w artykule poniżej jest inny niż dotychczasowe i stanowi odmienne, nowe i świeże podejście do tego tematu.

2. Analiza efektywności procesów a jej komputerowa realizacja

Przeprowadzenie analizy stanowi symulację i jest próbą odtworzenia rzeczywistego układu, przy użyciu w tym przypadku odpowiedniego programu komputerowego. Największą komplikacją i wadą symulacji jest to, iż zawsze są to założenia teoretyczne, które starają się odwzorować rzeczywistość (co nie zawsze ma miejsce). Dodatkowym problemem w czasie tworzenia modelu komputerowego jest niejednorodność, zmienność warunków wejściowych oraz brak możliwości konkretnego ich scharakteryzowania oraz opisania.

Ilość wytworzonego biogazu w pełni uzależniona jest od rodzaju i ilości wsadu, który w każdym gospodarstwie rolnym jest inny i stanowi sprawę indywidualną. Dlatego należało opracować model, który sprostaby każdej ewentualności oraz możliwości, która może mieć miejsce. Wzorzec ten, został stworzony na potrzeby udoskonalenia efektywności procesów uzyskania biogazu w biogazowni rolniczej, uwzględniający wszystkie prawdopodobne warianty w danym gospodarstwie. W oparciu o niego, można przewidzieć, skalkulować opłacalność inwestycji biogazowni już na etapie jej projektu. Dzięki użyciu odpowiednim formułom i wyliczeniom można obliczyć efektywność biogazowni, niezależnie od ilości i jakości substratów wejściowych. Opracowany sposób analizy jest narzędziem, które będzie użyteczne dla małego gospodarstwa rolnego, jak i dla dużego gospodarstwa hodowlanego. Dzięki wykorzystaniu tabeli, zawierającej charakterystykę substratów wraz z potencjałem produkcji biogazu, można przeliczyć bilans energetyczny (energia cieplna i elektryczna w układzie kogeneratywnym) danej biogazowni rolniczej.

Tab. 1. Charakterystyka wybranych substratów wraz z potencjałem produkcji biogazu [7]

Nazwa substratu		Procentowa zawartość s.m. ¹ w Mg substratu, % wsadu k_{sm}	Procentowa zawartość s.m.o. ² w zawartości s.m., % s.m.o. k_{smo}	Produkcja metanu z 1 Mg s.m.o., m ³ /Mg s.m.o., v
Odpady z hodowli zwierzęcej	Gnojowica bydłęca	0,095	0,774	222,5
	Gnojowica świńska	0,66	0,761	301,0
	Gnojowica kurza	0,15	0,755	320,0
	Gnojowica krów mlecz- nych	0,085	0,855	154,0
	Gnojówka	0,02	0,600	222,5
Odpady po- ubojowe	Osady poflotacyjne z rzeźni	0,14	0,906	680,0
	Zawartość żołądków bydła	0,15	0,84	264,0
	Odseparowana tkanka tłuszczowa	0,34	0,49	700,0
Odpady rol- nicze	Słoma	0,87	0,87	387,5
	Trawa	0,11	0,88	587,5
	Kiszonka kukurydzy	0,35	0,87	560,0
	Siano	0,87	0,89	417,9
	Ziemniaki - liście	0,25	0,79	587,5
Przetwórstwo spożywcze	Odpady i resztki owoców	0,45	0,61	400,0
	Odpady i pozostałości warzyw	0,14	0,89	370,0
	Melasa	0,81	0,92	301,6
	Wysłodziny browarnicze	0,20	0,81	545,1
	Wywar pogorzelniany ziemniaczany	0,14	0,89	387,7
	Gliceryna	0,84	0,91	1196,0
	Odpady z produkcji oleju	0,78	0,97	600,0
	Serwatka	0,05	0,86	383,3

Odpady komunalne	Odpady z produkcji serów	0,79	0,94	610,2
	Odpady piekarnicze	0,87	0,97	403,4
	Odpady organiczne komunalne	0,6	0,55	396,8
	Odpady kuchenne i przetworzone artykuły żywnościowe	0,189	0,72	530,0
	Zieleń miejska	0,23	0,88	489,7

¹s.m. – sucha masa, ²s.m.o. – sucha masa organiczna

Powyższa tabela jest podstawą do komputerowej realizacji prowadzonej analizy matematycznej zaprezentowanej poniżej.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	Dzienna ilość biomasy w gospodarstwie															
3	ilość odpadów zwierzęcych															
4			ilość zwierząt (n)	dzienna masa nawozu zwierzęcego (kg)	masa nawozu zwierzęcego											
5					kg/dobę	t/dobę										
6	bydło	M ₁					M _{wi} = $\frac{M_i \cdot \left(\frac{\psi_n}{100} - \frac{\psi_i}{100} \right)}{1 - \frac{\psi_n}{100}}$			k _{zmi}	k _{zmo}	v	V ^d _{biogaz}			
7	świnie	M ₂														
8	kury	M ₃														
9																
10	ilość substratów roślinnych															
11			roczna produkcja, t	dzienna ilość	wilgotność	ilość dodawanej wody (przy wilgotności < 70%)	Dzienna masa substratu (masa surowca + masa wody)			k _{zmi}	k _{zmo}	v	V ^d _{biogaz}			
12	słoma	M ₄				M _{w4}	M _{s4}									
13	trawa	M ₅				M _{w5}	M _{s5}									
14	kukurydza	M ₆				M _{w6}	M _{s6}									
15							Suma:	M _{dR}			dzienna ilość biogazu			Σ V ^d _{biogaz} m ³		
16	dzienna ilość biomasy M _d =															
17																
18	ilość nawozu do recyklingu dziennie G _d = $\frac{M_d}{t_{rek} - t_{obst}} \cdot t_{rek}$															
19					t/dobę	kg/dobę				Objętość zbiornika gazu			m ³		Δt ilość dni C _g	
20			V _g = $\frac{G_d \cdot k_d}{\rho_g}$							produkcja biogazu za rok			m ³	zima lato		
21	rozmiary bunkra dla obornika															
22			ρ _i		m ³					Energia ciepłarniana potrzebna do ogrzania biomasy						
23	rozmiary komory fermentacyjnej V _{cf} =															
24					m ³		średnica (d)			zima lato	Q ^{zim} _d =		Q ^{zim} _d =		kWh	
25	osnowa S _o = $\frac{\pi d^2}{4}$															
26			m ²	boczna powierzchnia	S _b = π · d · h		m ²			zima lato	Q ^{zim} _d =		Q ^{zim} _d =		kWh	
27	powierzchnia fermentacyjna F															
28				m ²							Suma:	Q ^{zim} _d =		Q ^{zim} _d =		
29	Roczna produkcja energii	Teoretyczna ilość energii wytwarzanej														
30		Teoretyczna moc cieplna w układzie kogeneracyjnym														
31		Teoretyczna moc elektryczna w układzie kogeneracyjnym														
32																
33																

Rys. 1. Wygląd arkusza obliczeniowego realizowanego w MS Excel

W przyjętym wariancie, w gospodarstwie rolnym znajdują się trzy rodzaje zwierząt hodowlanych: bydło, świnie oraz kury. Odpadami z produkcji rolnej są: słoma, trawa oraz kiszonka kukurydzy. Dane wejściowe, można zmieniać, w zależności od potencjału zasobów danego gospodarstwa. Przyjęty dla tego wariantu wsad, został w modelowaniu opracowany, na podstawie danych statystycznych GUS-u dla przeciętnego gospodarstwa rolniczo-hodowlanego w Polsce, co do ilości zwierząt hodowlanych przypadających na dane gospodarstwo [8].

3. Symulacja matematyczna

Na początku, przystępując do obliczeń związanych z przyszłą, ewentualną efektywnością danej biogazowni rolniczej, należy obliczyć dzienną (łącną) ilość odpadów rolniczych i zwierzęcych, które powstają w gospodarstwie. Do tego posłuży następujący wzór:

$$M_d = M_{dz} + M_{dR} \quad (1)$$

gdzie: M_d – dzienna ilość biomasy w gospodarstwie (t), $M_{dz} = \sum_{i=1}^3 M_i$ – dzienna ilość odpadów zwierzęcych

(t), $M_{dR} = \sum_{i=4}^6 M_{si}$ – dzienna ilość substratów rolniczych (t).

Do obliczenia dziennej ilości odpadów zwierzęcych każdego rodzaju, zostanie wykorzystany kolejny wzór:

$$M_i = n_i \cdot m_{gi} \quad (i = \overline{1,3}, 1 - \text{bydło}, 2 - \text{świnie}, 3 - \text{kury}) \quad (2)$$

gdzie: n_i – liczba zwierząt, m_{gi} – dzienna masa nawozu zwierzęcego (obornika) (tab. 2 poniżej).

Tab. 2 Dobowa ilość odpadów z różnego rodzaju hodowli zwierzęcej [9]

Nazwa substratu		Dobowa ilość s odpadów z 1 głowy, kg
Odpady z hodowli zwierzęcej	Gnojowica bydlęca	40-50
	Gnojowica świńska	10-15
	Gnojowica kurza	0,005
	Gnojowica krów mlecznych	55
	Gnojówka	1,5

	A	B	C	D	E	F
1	Dzienna ilość biomasy w gospodarstwie					
3	ilość odpadów zwierzęcych					
4			ilość zwierząt (n)	dzienna masa nawozu zwierzęcego (kg)	masa nawozu zwierzęcego	
5					kg/dobę	t/dobę
6	bydło	M_1	25	50	=C6*D6	=E6/1000
7	świnie	M_2	42	15	=C7*D7	=E7/1000
8	kury	M_3	150	0.005	=C8*D8	=E8/1000
9	Suma (M_{sz}):					=SUMA(F6:F8)

Rys. 2. Formuły w dziennej ilości odpadów zwierzęcych

Następnie należy obliczyć dzienną ilość substratów rolniczych, która jest zależna od gospodarstwa indywidualnego (założenie dla przyjętego wariantu). Roczny zapas należy podzielić na ilość dni w roku (365):

$$M_i = \frac{M_i}{365} \quad (i = \overline{4,6}, 4 - \text{słoma}, 5 - \text{trawa}, 6 - \text{kiszonka kukurydzy}) \quad (3)$$

Proces fermentacji odpadów odbywa się przy danej wilgotności substratu (ψ_n), nie mniejszej jak 70 – 80%. Przy ładowaniu do biogazowi biomasy pochodzenia roślinnego lub przy rozliczeniach objętości komory fermentacyjnej, konieczne należy uwzględnić dodatkową ilość wody. Wilgotność substratów zaznaczona jest w tabeli 3. Jeśli wilgotność roślinnych substratów jest <80%, należy dodać wodę. Jeśli wilgotność biomasy wynosi $\geq 80\%$, wody nie trzeba dodawać.

Tab. 3 Wilgotność zwierzęcych i roślinnych substratów [10]

Surowiec	Zawartość wody, (ψ_n) %	Biogaz, m ³ / Mg s.m.o.
Gnojowica bydlęca	86 – 91	300 – 700
Gnojowica trzody (świnie)	90 – 97	200 – 500
Obornik bydła	67 – 87	170 – 350
Obornik trzody (świnie)	65 – 90	210 – 300
<u>Słoma</u>	4 – 27; <u>12</u>	150 – 350
Siano	8 – 14	500 – 580
<u>Kiszonka traw</u>	75 – <u>80</u>	550 – 620
<u>Kiszonka kukurydzy</u>	65 – <u>80</u>	450 – 700
Zboże	65 – 70	550 – 680
Koniczyna	-	445
Trzcina	-	314

Janowic	-	446
Wytłoki owoców	62 – 88	590 – 660
Odpady browarniane	55 – 80	580 – 750
Odpady z gorzelni	72	300 – 700
Melasa z cukrowni	10 – 20	360 – 490
Odpady rzeźnicze	10 – 95	200 – 1200
Padlina drobiu	65	500 – 630
Pióra	75	200
Odpady – tłuszcze	30 – 98	700
Zmieszane odpady komunalne	35 – 45	100 – 200
Odpady kuchenne	50 – 60	150 – 500
Papier	25 – 30	260
Odpady zielone	20 – 75	200 – 500
Liście	20	100 – 300
Osady ściekowe	70 – 80	400 – 600
Odpady z handlu	80 – 85	400 – 600

Z tab. 3 wynika, iż % wody w słomie kształtuje się w przedziale 4 – 27% (dlatego też, należy dodać do niej wody), wilgotność trawy wynosi 75 – 80%, a w kiszonce kukurydzy wilgotność stanowi 65 – 80%. Niech substrat posiada wilgotność na poziomie 80%, a słoma niech będzie o wilgotności ψ_4 wynoszącej 12%.

Należy teraz obliczyć ilość wody, która musi być dodana do roślinnych odpadów. Jeżeli do surowca i z masą M_i oraz z wilgotnością ψ_i , dodać masę wody M_{wi} otrzymamy substrat z masą $(M_i + M_{wi})$ i z wilgotnością ψ_n .

Dla otrzymania substratu z zaznaczoną wilgotności $\psi_n = 80\%$ z surowca i z masy M_i i wilgotności ψ_i , trzeba dodać do niego masę wody M_{wi} .

$$(M_i + M_{wi}) \cdot \frac{\psi_n}{100} = M_i \cdot \frac{\psi_i}{100} + M_{wi} \quad \Rightarrow \quad M_i \cdot \frac{\psi_n}{100} - M_i \cdot \frac{\psi_i}{100} = M_{wi} - M_{wi} \cdot \frac{\psi_n}{100}$$

$$M_{wi} = \frac{M_i \cdot \left(\frac{\psi_n}{100} - \frac{\psi_i}{100} \right)}{1 - \frac{\psi_n}{100}} \quad (4)$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
10	Ilość substratów roślinnych								
11			roczna produkcja, t	dzienna ilość	wilgotność	ilość dodawanej wody (przy wilgotności < 70%)		Dzienna masa substratu (masa surowca + masa wody)	
12	słoma	M_4	36	=C12/365	0.12	M_{w4}	=D12*(0.8-E12)/(1-0.8)	M_{z4}	=D12+G12
13	trawa	M_3	22.5	=C13/365	0.8	M_{w3}	=D13*(0.8-E13)/(1-0.8)	M_{z3}	=D13+G13
14	kukurydza	M_5	18	=C14/365	0.8	M_{w5}	=D14*(0.8-E14)/(1-0.8)	M_{z5}	=D14+G14
15						Suma:		M_{dR}	=SUMA(I12:I14)

ys. 3. Dzienna ilość odpadów substratów roślinnych oraz wilgotność w ujęciu formuł matematycznych

$$\text{Łączna dzienna ilość substratu: } M_d = M_{dz} + M_{dR} \quad (5)$$

Ilość nawozu naturalnego, do recyklingu w reaktorze dziennie (z uwzględnieniem czasu na obsługę):

$$G_d = \frac{M_d}{t_{rok} - t_{obsl}} \cdot t_{rok} \quad , \quad (6)$$

gdzie: G_d – ilość biomasy, t/dobę, t_{rok} – ilość dni (365), t_{obsl} – czas obsługi reaktora, dni (średnio 15 dni).

Rozmiar bunkra (zbiornika wstępnego) dla obornika, z którego odbywa się ładowanie do biogazowni (komory fermentacyjnej):

$$V_b = \frac{G_d \cdot k_s}{\rho_s} \text{ (m}^3\text{)} \quad (7)$$

gdzie: ρ_s – gęstość zasypanego substratu, kg/m³ ($\rho_s = 1020 \text{ kg/m}^3$), k_s – współczynnik uwzględniający zmiany gęstości substratu, w zależności od początkowej zawartości wilgoci ($k_s = 1,5$).

Rozmiar komory fermentacyjnej: $V_{kf} = \frac{(0,7 \dots 0,9) G_d t_f}{\rho_s}$, gdzie t_f – czas fermentacji, dni (30).

Zazwyczaj komory fermentacyjne mają kształt cylindryczny, wysokość do jej średnicy wewnętrznej wynosi $\frac{h}{d}$

$$0,9 \dots 1,3. \text{ Niech } \frac{h}{d} = 1. V_{kf} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h = \frac{\pi d^2}{4} \cdot d \Rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{4V_{kf}}{\pi}} \quad (8)$$

Powierzchnia fermentacyjna

$$F = S_b + 2 \cdot S_o \text{ (m}^2\text{)},$$

gdzie: S_b – obszar powierzchni bocznej komory fermentacyjnej, $S_o = \frac{\pi d^2}{4}$ (m²); S_o – osnowa komory fermentacyjnej $S_b = \pi \cdot d \cdot h$ (m²).

Odpowiednią część modelu przedstawiono poniżej (rys 4).

	A	B	C	D	E	F	G	H
18	ilość nawozu do recyklingu dziennie			$G_d = \frac{M_d}{t_{rek} - t_{zad}}$	t/dobę	kg/dobę		
19					=D16*365/(365-15)	=E19*1000		
20			$V_b = \frac{G_d \cdot k_s}{\rho_s}$					
21				=F19*1.5/1020	m ³			
22	rozmiary bunkra dla obornika							
23	rozmiary komory fermentacyjnej			=0.8*F19*30/1020	m ³		średnica (d)	= (4*V23/3.14)^(1/3)
24								
25	osnowa	$S_o = \frac{\pi d^2}{4}$	=PI()*POTĘGA(H23;2)/4	boczna powierzchnia	$S_b = \pi \cdot d \cdot h$		=PI()*H23*2	m ²
26			m ²					
27	powierzchnia fermentacyjna			=G25+2*C25	m ²			

Rys. 4. Obliczenia rozmiarów biogazowni

Maksymalna wydajność biogazu w najbardziej intensywnych momentach zależy od składu chemicznego biomasy, który jest określony rodzajami odpadów (zwierzęcych lub roślinnych). Tabela 3 przedstawia ilość suchej masy w biomasie [11], jak również procent zawartości suchej masy organicznej do suchej masy substratu. Metan wydobywany jest ze składnika organicznego substratu, dlatego też ilość biogazu zależy od ilości suchej masy organicznego substratu.

$$V_{biogaz}^d = \frac{\sum (M_i \cdot k_{ism} \cdot k_{ismo} \cdot v_i)}{K} \cdot Z \quad (9)$$

gdzie: V_{biogaz}^d – codzienna wydajność biogazowni (m³), M_i – łączna ilość i -tego rodzaju odpadów ($i = \overline{1,6}$)

(kg), k_{ism} – procentowa zawartość s.m. w Mg substratu (tab. 2), k_{ismo} – procentowa zawartość s.m.o. w s.m.,

Z – stan rozkładu materii organicznej. Zwiększenie czasu fermentacji do zakończenia procesu rozkładu jest nieuzasadnione ekonomicznie, ponieważ wymaga znacznego zwiększenia objętości komory fermentacyjnej $Z = 0,3$; K – współczynnik rozpuszczalności biogazu (1,1 – 1,5), v_i – produkcja metanu z 1 Mg s.m.o. ($\text{m}^3/\text{Mg s.m.o.}$) (tab. 2).

	J	K	L	M	N
1					
3					
4					
5	k_{sm}	k_{smg}	v	V_{biogaz}^d	
6	0.095	0.774	222.5	=F6*J6*K6*L6*0.3/1.14	
7	0.66	0.761	301	=F7*J7*K7*L7*0.3/1.14	
8	0.15	0.755	320	=F8*J8*K8*L8*0.3/1.14	
9					
10					
11	k_{sm}	k_{sm}	v	V_{biogaz}^d	
12	0.87	0.87	387.5	=D12*J12*K12*L12*0.3/1.14	
13	0.11	0.88	587.5	=D13*J13*K13*L13*0.3/1.14	
14	0.35	0.87	560	=D14*J14*K14*L14*0.3/1.14	
15	dzienna ilość biogazu			=SUMA(M12:M14)+SUMA(M6:M8)	$\sum V_{biogaz}^d [\text{m}^3]$

Rys. 5. Produkcja dziennej ilości biogazu w modelu

Objętość zbiornika gazu biorą w rozliczeniu 3^{ch} objętości dobowego wyjścia gazu $V_{kg} = 3 \cdot V_{biogaz}^d$. Roczna produkcja biogazu $V_{biogaz}^{\text{rok}} = V_{biogaz}^d \cdot (365 - 15)$

Kolejnym krokiem jest obliczenie ilości energii cieplarnianej, potrzebnej do podgrzania biomasy.

$$Q = c_g \cdot G \cdot \Delta t \quad (10)$$

gdzie: Q – energia cieplna dla ogrzewania komory fermentacyjnej do temperatury fermentacji ($\text{kWh} - 30^\circ\text{C}$),

G – ilość substratu, przechodzącego przez bioreaktor dziennie (kg), Δt – różnica temperatur w komorze fermentacyjnej i powietrzu ($^\circ\text{C}$), c_g – ciepło właściwe płynnego gnoju ($0,00087 \text{ kWh}/^\circ\text{C}$).

Dla ułatwienia obliczeń, zakłada się, że średnia temperatura w porze letniej (245 dni – 15 dni remontu) jest średnio 20°C , w porze zimowej $\pm 5^\circ\text{C}$ (120 dni):

$$\text{zimna pora roku } \Delta t_{zima} = 30 - 5 = 25^\circ\text{C}, \text{ dziennie: } Q_{zima}^d = c_g \cdot G_d \cdot \Delta t_{zima}$$

$$\text{wtedy za cały okres } Q_{zima} = Q_{zima}^d \cdot 120$$

$$\text{w ciepłym okresie } \Delta t_{lato} = 30 - 20 = 10^\circ\text{C}, \text{ dziennie: } Q_{lato}^d = c_g \cdot G_d \cdot \Delta t_{lato}$$

$$\text{wtedy za cały okres } Q_{lato} = Q_{lato}^d \cdot (365 - 120 - 15)$$

$$\text{Roczna ilość energii cieplnej do ogrzewania biomasy wynosi: } Q_{rok} = Q_{zima} + Q_{lato}$$

Następnie określa się ilość biogazu wymaganego do dogrzewania biomasy: $V_{dogr}^{rok} = \frac{Q_{rok}}{q \cdot \eta}$ (11)

gdzie: V_{dogr}^{rok} – ilość biogazu wymaganego do ogrzewania biomasy (m^3), Q_{rok} – całkowita ilość energii cieplnej wymaganej do podgrzania biomasy, q – wartość opałowa biogazu ($9,6 \text{ kWh}/m^3$), η – sprawność systemu (0,97).

Biogaz towarowy – łączna ilość wyprodukowanego biogazu minus ilość biogazu na potrzeby własne biogazowni (ogrzewanie substratu):

$$V_T^{rok} = V_{biogaz}^{rok} - V_{dogr}^{rok} \quad (12)$$

	H	I	J	K	L	M	N	O
16								
17		Objętość zbiornika gazu	=M15*3	m^3		Δt	ilość dni	C_2
18					zima	25	120	0.00087
19		produkcja biogazu za rok	=M15*(365-15)	m^3	lato	10	=365-N18-15	
20								
21		Energia cieplarna potrzebna do ogrzania biomasy						
22			zima	$Q_{zimad}^{zimad} =$	=M18*\$O\$18*\$F\$19	$Q_{zimad}^{zimad} =$	=L22*N18	kWh
23			lato	$Q_{latad}^{latad} =$	=M19*\$O\$18*\$F\$19	$Q_{latad}^{latad} =$	=L23*N19	kWh
24				Suma:		$Q_{rok}^{rok} =$	=SUMA(N22:N23)/1000	MWh
25								
26				ilość biogazu do ogrzania biomasy	$V_{dogr}^{rok} =$	=N24/(9.6*0.97)*1000	m^3	
27				Biogaz towarowy	$V_T^{rok} =$	=J19-M26	m^3	

Rys. 6. Roczna produkcja biogazu

Następnym etapem przy dokonywaniu obliczeń efektywności biogazowni jest obliczenie rocznej produkcji energii:

Teoretyczna ilość energii do wytwarzania: $Q_T^{rok} = V_T^{rok} \cdot q$, (13)

Teoretyczna moc cieplna w układzie kogeneracyjnym-

Sprawność cieplna w kogeneracji 43%, a $P_t = 0,43$. $Q_{cieplo}^{rok} = Q_T^{rok} \cdot P_t$ Sprawność elektryczna w kogeneracji 38%, a $P_{el} = 0,38$. $Q_{el}^{rok} = Q_T^{rok} \cdot P_{el}$

Teoretyczna moc elektryczna w układzie kogeneracyjnym-

	A	B	C	D	E	F	G	H
29								
31		Roczna produkcja energii		Teoretyczna ilość energii wytwarzanej	$Q_T^{rok} =$	=M27*9.6*1000	MWh	
33				Teoretyczna moc cieplna w układzie kogeneracyjnym	$Q_{cieplo}^{rok} =$	=H29*0.43	MWh	
34				Teoretyczna moc elektryczna w układzie kogeneracyjnym	$Q_{el}^{rok} =$	=H29*0.38	MWh	

Rys. 7. Roczna produkcji energii

Był to ostatni krok w tworzeniu formuł matematycznych zastosowanych w programie komputerowym Microsoft Excel tworzących wzorec komputerowy do zoptymalizowania procesów wytwarzania biogazu. Należy teraz zanalizować, czy przyjęte założenia dla danego gospodarstwa rolnego (wariantu) są opłacalne z punktu ekologicznego w celu założenia biogazowni rolniczej. Można to zobrazować na kolejnym rysunku, dotyczącym otrzymanych wyników rocznej produkcji energii.

	A	B	C	D	E	F	G	H
29							$Q_T^{rok} =$	126.411 MWh
31		Roczna produkcja energii		Teoretyczna ilość energii wytwarzanej	$Q_T^{rok} =$			
33				Teoretyczna moc cieplna w układzie kogeneracyjnym	$Q_{cieplo}^{rok} =$		54.3567	MWh
34				Teoretyczna moc elektryczna w układzie kogeneracyjnym	$Q_{el}^{rok} =$		48.0361	MWh

Rys. 8. Otrzymane wyniki dla modelowanego gospodarstwa

Przyjęty rodzaj oraz ilość wsadu w ogólnym rozliczeniu przyniósł wydajność biogazowni na poziomie 126,411 MWh. Według jednej z aplikacji elektronicznych zużycie energii elektrycznej w 2012 r. w miastach na 1 gospodarstwo domowe wynosiło 1,8817 MWh [12]. Z przeliczonych danych wynika, iż energii wytwarzanej przez tę biogazownię rolniczą, starczyłoby dla ~67 rodzin na cały rok.

4. Podsumowanie

Obliczenia przyjęte dla założonego wariantu dowiodły, iż stworzony wzorzec komputerowy oparty o analizę matematyczną jest użyteczny dla skalkulowania efektywności danej biogazowni rolniczej. Przyjęte substraty (w ilości i jakości), dzięki obliczeniom z zaimplementowanymi formułami oprogramowania MS Excel, pozwalają stwierdzić, iż projekt biogazowni z tymi założeniami, nie jest opłacalny dla szerszego grona odbiorców. Zaprezentowany dobór substratów w jakości, jak i ilości przedstawia biogazownię, która służyć może jedynie dla paru lub jednego gospodarstwa domowego. Będzie ona spełniała funkcję dodatkowego, odnawialnego źródła do produkcji energii elektrycznej bądź cieplnej.

Tworzenie formuł w programie Excel z uwzględnieniem powyższej analizy jest proste, co sprawia, że staje się uniwersalne i każdy może je wykonać. Ogół ludzi dzięki szeregowi obliczeń może zanalizować potencjalną opłacalność inwestycji przydomowej biogazowni rolniczej. Szczególnie jest to pomocne grupie rolników, którzy zakładają, planują budowę takiej biogazowni. Każdy z nich samodzielnie może obliczyć, czy dysponując swoimi zasobami, substratami (wsadem), opłaca się budować, inwestować w projekt biogazowni. Konstrukcja obliczeniowa jest elastyczna, co pozwala na wprowadzanie danych wejściowych różnego rodzaju, tak jak zostało to przedstawione w powyższych tabelach. Tworzenie odpowiednich form matematycznych uwzględniających powyższą analizę komputerowo-matematyczną jest wygodne, intuicyjne, a przede wszystkim istnieje możliwość modyfikacji w stosunku do jakości, rodzaju i ilości substratów, którymi dysponuje dane gospodarstwo rolne (hodowlane), a które nie zostały uwzględnione w tym artykule.

Obecnie, symulacja jest na etapie ciągłej optymalizacji, aby usprawnić jego zakres funkcjonowania. W przyszłości, planowana jest jej rozbudowa, aby objąć swoim zasięgiem np. prognozę finansową budowy takiej biogazowni przy wyliczonej, teoretycznej ilości energii wytwarzanej.

Wzorzec ten stanowiący obszerną analizę matematyczną, na podstawie określonych substratów, pozwala na szybki bilans dotyczący inwestycji w biogazownię dla zobrazowania energetycznych korzyści. Jednak struktura tego symulatora pozwala na rozszerzenie jego obszaru działań w przyszłości tak, aby móc ocenić nie tylko zyskowność energetyczną, ale również skalkulować finansowy aspekt budowy biogazowni rolniczej.

Literatura

1. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne. (Dz. U. z 2014 r.);
2. Lewandowski W., *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001;
3. Romaniuk W., Głazczka A., *Utylizacja odpadów i pozyskanie energii w biogazowniach rolniczych*, [w:] *Ekopartner*, nr 9, Warszawa 1999, str. 8-9;
4. BIOGAZ ZENERIS [dostęp: 30 listopada 2014], <http://www.biogaz.com.pl/index.php/kalkulator-biogazowy>
5. BioEnergyFarm [dostęp: 30 listopada 2014], <http://www1.bioenergyfarm.eu/pl/platforma/narzedzia/biogazownie-rolnicze/kalkulator-biogazowni-rolniczych>;
6. Mulka R., Szlachta J., *Stan wiedzy odnośnie modelowania procesów fermentacji anaerobowej*, [w:] Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, *Inżynieria Rolnicza*, Wyd. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej R. 17, nr 3, t. 1, Kraków 2013, str. 281-290, Biblioteka Nauki [dostęp: 30 listopada 2014], <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-dba3d05d-fd71-4cd6-b15b-34e6a35b62c7/c>;

7. Curkowski A., Oniszk-Popławska A., *Surowce do produkcji biogazu – uproszczona metoda wydajności biogazowni rolniczej*, [w:] *Czysta Energia* nr 1, Poznań 2010;
8. Główny Urząd Statystyczny Departament Rolnictwa, *Rolnictwo w 2013 r.*, Warszawa 2014, [dostęp: 30 listopada 2014], <http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rolnictwo-lesnictwo/rolnictwo/rolnictwo-w-2013-r-3,10.html>;
9. PPR.pl. Pierwszy portal rolny. Nawozy organiczne [dostęp: 30 listopada 2014], <http://www.ppr.pl/dzial-nawozy-organiczne-2205.php>;
10. Przewodnik - Biogaz rolniczy. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Opole, 2010. [dostęp: 30 listopada 2014] <http://www.oze.opole.pl>;
11. BIOGAZ ZENERIS [dostęp: 30 listopada 2014], <http://www.biogaz.com.pl/index.php/terminologia>;
12. mojePaństwo - zestaw aplikacji kontrolujących [dostęp: 30 listopada 2014], http://mojepanstwo.pl/dane/bdl_wskazniki/137,zuzycie-wody-energii-elektrycznej-gazu-gospodarstwach-domowych?d1=1000&d2=1003;