

Alina Dereszewska\*, Stanisław Cytawa\*\*

\*Akademia Morska w Gdyni, \*\*Oczyszczalnia ścieków „Swarzewo”

## PRZETWARZANIE AGROODPADÓW W ŚWIETLE GOSPODARKI O OBIEGU ZAMKNIĘTYM

### *PROCESSING OF AGRO-WASTES IN THE LIGHT OF CIRCULAR ECONOMY*

**Słowa kluczowe:** odpady rolnicze, recykling organiczny, biogaz, oczyszczalnia ścieków

*Key words:* agro- waste, organic recycling, biogas, wastewater treatment plant

*JEL codes:* Q29, Q53

**Abstrakt.** Omówiono metody postępowania z odpadami rolniczymi w kontekście zasady maksymalnego obiegu zamkniętego dla związków organicznych. Przedstawiono koncepcję regionalnej gospodarki agroodpadami z uwzględnieniem istniejących rozwiązań technologicznych, w tym biogazowni rolniczych oraz biogazowni zlokalizowanych przy oczyszczalniach ścieków. Oszacowano potencjał biogazowy dla odpadów rolniczych współfermentowanych z osadem wstępnym oczyszczalni ścieków. Przedstawiono obieg azotu, fosforu i węgla w biogazowni przy oczyszczalni ścieków. Określono stopień recyklingu organicznego tych pierwiastków.

### Wstęp

Gospodarka o obiegu zamkniętym jest koncepcją gospodarczą, w której produkty, materiały oraz surowce powinny pozostawać możliwie jak najdłużej w obiegu, a wytwarzanie odpadów powinno być zminimalizowane. Idea ta uwzględnia wszystkie etapy cyklu życia produktu, zaczynając od jego projektowania, przez produkcję, konsumpcję, zbieranie odpadów, aż do ich zagospodarowania. W cyklach technicznych gospodarki o obiegu zamkniętym materiały konserwuje się, wtórnie wykorzystuje, odnawia i poddaje recyklingowi. W cyklach biologicznych wydzielają się składniki biochemiczne bądź je przetwarza w sposób kaskadowy i na koniec zwraca do gleby, odbudowując tym samym kapitał przyrodniczy [Ellen MacArthur Foundation 2014]. W tej koncepcji odpady są traktowane jako surowce wtórne, co pozwala ponownie wykorzystać zawartą w nich energię i składniki. Rozwiązania z obszaru gospodarki o obiegu zamkniętym prowadzą również do minimalizacji negatywnego wpływu wytwarzanych produktów na środowisko. W 2015 roku Komisja Europejska opublikowała komunikat będący zbiorem propozycji, których realizacja ma doprowadzić do przejścia krajów Unii Europejskiej (UE) na drogę gospodarki o obiegu zamkniętym [KE 2015]. Komunikat ten zawiera wskazówki dotyczące gospodarki odpadami, w tym propozycje specyficznych rozwiązań dla odpadów spożywczych i biomasy, które stanowią trzon odpadów rolniczych. W świetle zawartych w nim wytycznych, wyeksponowana została potrzeba wyodrębniania strumieni odpadów na cele paszowe, przydatnych w rozwiązaniach nawozowych bądź przeznaczonych do produkcji energii.

Rocznie w Polsce zagospodarowaniu podlega ponad 10 mln t odpadów rolniczych, jednak ich rzeczywista masa jest znacznie większa. Spowodowane jest to m.in. tym, że część odpadów jest traktowana przez właścicieli agrofirm jako odpady komunalne i nie podlega ewidencji [Daniel i in. 2012]. Tymczasem biodegradowalne odpady organiczne generowane w gospodarstwach domowych stanowią 40-50% wszystkich odpadów komunalnych. Do zagospodarowania odpadów rolniczych wykorzystuje się głównie kompostownie, biogazownie rolnicze lub spalarnie.

Utylizacja agroodpadów w biogazowniach rolniczych, może być uznana za metodę o obiegu zamkniętym, jeżeli powstający poferment zostanie zagospodarowany jako nawóz. Biogaz rolniczy wytwarzany jest w procesie fermentacji metanowej surowców rolniczych, produktów

ubocznych rolnictwa, płynnych lub stałych odchodów zwierzęcych, produktów ubocznych, lub pozostałości z przetwórstwa produktów pochodzenia rolniczego albo biomasy leśnej z wyłączeniem gazu pozyskiwanego z surowców pochodzących z oczyszczalni ścieków oraz składowisk odpadów [Dz.U. 2011, nr 205, poz. 1208]. W procesie fermentacji tylko część substratów użytych jako wsad ulega przemianom do biogazu. Pozostałość pofermentacyjną najczęściej wykorzystuje się w celach nawozowych (pośrednio lub po zmieszaniu z gnojowicą). Masę pofermentacyjną z biogazowni rolniczej można traktować jako odpad lub jako podlegający obrotowi handlowemu nawóz organiczny. W przypadku użyźniania pól pofermentem z biogazowni rolniczych, dawki, terminy i zasady jego stosowania określa ustawa o nawozach i nawożeniu [Dz.U. nr 147, poz. 1033 z późn. zm.]. Poferment zawierający znaczne ilości substancji biogenych, powinien być stosowany tylko w ściśle określonych warunkach, w przeciwnym wypadku związki azotu i fosforu przenikające do gleby mogą być wymywane i przyczynić się do eutrofizacji wód. Wadą pofermentu jest również duże uwodnienie, kłopotliwa aplikacja do gleby i sezonowe wykorzystanie. Wiąże się to z koniecznością długotrwałego magazynowania znacznych jego objętości.

Beztlenowe przekształcanie biologiczne, które w konsekwencji prowadzi do odzysku energii i produkcji nawozu organicznego jest uznawane za najbardziej optymalną metodę przeróbki frakcji organicznej odpadów. Jednak budowa biogazowni rolniczej niesie ze sobą ogromne koszty. Tym samym obecna sieć biogazowni w Polsce jest uboga i niewiele gospodarstw rolnych może z tej technologii skorzystać. Znaczne koszty generuje również zapewnienie odpowiedniej bazy surowcowej. Mankamentem biogazowni rolniczej jest konieczność zapewnienia ciągłości dostaw substratów do komory fermentacyjnej. Z tego względu biogazownie najczęściej zlokalizowane są w okolicy ferm, w których powstaje gnojowica [Goliński, Jok 2005].

Wybudowanie nowych biogazowni rolniczych wiąże się ze znacznymi kosztami, a niejednokrotnie również z protestem lokalnej społeczności. W regionach odległych od takich instalacji do zagospodarowania odpadów rolniczych należy wykorzystać już istniejące lokalne struktury. Zamknięcie obiegu dla niektórych odpadów organicznych można uzyskać m.in. w biologicznych oczyszczalniach ścieków komunalnych, szczególnie w tych obiektach, które mają kompostownie bądź przetwarzają osad w beztlenowych komorach fermentacyjnych z końcowym przyrodniczym zagospodarowaniem pofermentu. Takich jednostek jest dużo na terenie całego kraju, a przystosowanie ich do użytkowania odpadów rolniczych i komunalnych pochodzenia rolniczego nie wymaga tak wysokich nakładów finansowych, jak budowa biogazowni.

Zaletą biogazowni przy oczyszczalni ścieków jest całoroczna dostępność surowca w postaci osadu wstępnego i osadu nadmiernego z biologicznej części oczyszczania ścieków. Odpady rolnicze i komunalne mogą być wykorzystywane jako uzupełniające źródło, zwiększające produkcję biogazu. Magazyn odpadów stanowi dostępną w każdej chwili rezerwę energii. W komorach fermentacyjnych, z odpowiednio dawkowanych odpadów można uzyskać w krótkim czasie wzrost produkcji biogazu odpowiedni dla zaistniałych potrzeb energetycznych. Niektóre odpady organiczne można skierować również do kompostowni. Muszą one być szczegółowo segregowane u źródła wytwarzania. W oczyszczalni ścieków 'Swarzewo' rocznie uzyskiwane jest ok 4000 t kompostu, który dzięki szczegółowej kontroli przetwarzanego materiału posiada certyfikat nawozowy. Przyjęcie każdego odpadu sprawdzone jest pod względem stopnia segregacji i czystości chemicznej. Oczyszczalnia jest zdolna przyjąć 26 000 t odpadów organicznych rocznie, jest więc zapleczem do produkcji energii na potrzeby własne, a nawet do sprzedaży produkowanej nadwyżki.

Celem opracowania jest określenie stopnia recyklingu materii organicznej, pochodzącej ze strumienia odpadów organicznych produkowanych w sektorze rolniczym, w biologicznej oczyszczalni ścieków. Dokonano również oceny przydatności wybranych odpadów rolniczych do produkcji biogazu w procesie współfermentowania z osadem oczyszczalni.

## Material i metodyka badań

Proces fermentacji metanowej prowadzono w modelowym reaktorze o pojemności 50 litrów, wypełnionym osadem z komory fermentacyjnej biologicznej oczyszczalni ścieków w Swarzewie. W celu pomiaru potencjału biogazowego (SPB) wybranych odpadów rolniczych, do komory dodawano mieszaninę 500 g odpadu/500 g osadu wstępnego. Zmierzono również ilość biogazu wytwarzaną dla 500 g samego osadu wstępnego. Jako wartość kaloryczną uzyskanego biogazu przyjęto, 6,5 kWh/m<sup>3</sup> [Błaszczyk-Pasteczka, Żukowski 2007].

Jako wskaźnik stopnia recyklingu organicznego analizowanych odpadów przyjęto udział masy fosforu, azotu i węgla zwróconej do środowiska w postaci nawozu bądź pozyskanej w postaci biogazu. Obliczenia masowe przepływu węgla fosforu i azotu zostały wykonane na podstawie danych zarejestrowanych w oczyszczalni „Swarzewo” w okresie całego 2016 roku. Masę wykorzystanych w tym okresie odpadów organicznych oraz zawartą w nich masę azotu, fosforu i węgla przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Ilość odpadów organicznych i zawartych w nich pierwiastków biogenicznych przetwarzana w oczyszczalni „Swarzewo” w 2016 roku

Table 1. The amount of organic wastes and biogenic elements processed in the „Swarzewo” Sewage Treatment Plant in 2016

Substrat/Substratum	masa/ mass [t]	Ilość biogenów/ Nutrients amount [t]		
		N	P	C
Osad wstępny/ Primary sludge	3600	56,3	18,3	358,0
Tłuszcz rybny/ Fish fat	110	2,5	0,5	29,6
Tkanka rybną/ Fish tissue	20	1,5	0,09	5,4
Odpady kuchenne/ Kitchen waste	26	0,6	0,19	11,5
Rzepak/Rape	300	1,4	1,4	79,0
Warzywa/ Vegetables	350	3,9	1,9	112,6
Trawa/Grass	1180	13,0	6,5	379,7

Źródło: opracowanie własne  
Source: own study

## Wyniki badań

Na podstawie badań wyznaczono wskaźnik SBP (Specyficzny Potencjał Biogazowy) determinujący przydatność odpadu do fermentacji beztlenowej oraz szacunkową ilość energii, jaką można z odpadu uzyskać [Szatkowska i in. 2014]. Wyniki pomiarów wykonanych dla wybranych odpadów komunalnych oraz odpadów powstających w gospodarstwach rolnych zestawiono w tabeli 2. Wyniki zestawione w tabeli 2 charakteryzuje duża różnorodność, co wskazuje na konieczność wstępnego badania fermentowanych mieszanin, w celu określenia ich potencjału biogazowego. Na różnice wpływała zarówno jakość odpadu, jak i procesy mikrobiologiczne powstałe w trakcie przechowywania. Przykładowo, odpady które w trakcie przechowywania uległy procesom gnilnym bądź spleśniałe odpady, podawane w niewielkich dawkach zwiększają produkcję biogazu [Dereszewska, Korzeniowska-Ginter 2016]. Duże porcje odpadów, które uległy procesom gnilnym lub duże dawki substancji oleistych mogą powodować szybkie zakwaszenie środowiska osadu w komorze i zahamowanie procesu fermentacji beztlenowej. Dlatego dla każdego z fermentowanych odpadów niezbędne jest opracowanie metodyki jego dawkowania.

Na rysunku 1 przedstawiono cykl przetwarzania osadów ściekowych i odpadów organicznych w biologicznej oczyszczalni ścieków. Produkcja kompostu posiadającego certyfikat nawozowy, a tym samym będącego nowym pełnowartościowym produktem wytworzonym z odpadów, zapewnia recykling organiczny 38% azotu, 96,9% fosforu i 51,5% węgla, zawartych w substratach przetwarzanych w oczyszczalni. Należy jednak uwzględnić, że część fosforu obecna w

Tabela 2. Potencjał biogazowy odpadów współfermentowanych z osadem wstępnym biologicznej oczyszczalni ścieków

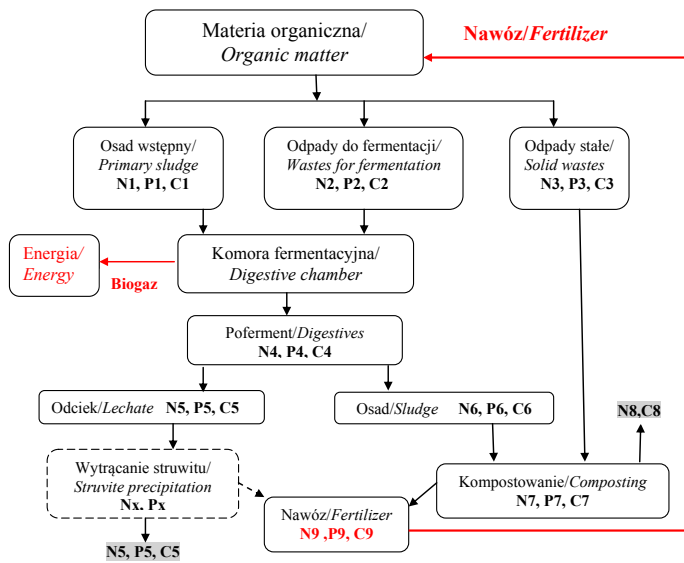
Table 2. Biogas potential of wastes co-fermented with preliminary sludge of the biological wastewater plant

Wsad do komory fermentacyjnej/ Fermentation chamber feedstock	Osad wstępny/ Primary sludge	Jabłka: osad/ Apples: sludge 1:1	Trociny: osad/ Sawdust: sludge 1:9	Kapusta: osad/ Cabbage: sludge 1:1	Resztki obiadowe: osad/ Meal residues: sludge 2:3
SBP [m <sup>3</sup> /t]	484	512	340	402	810
E [MWh]	3,1	3,3	2,2	2,6	5,2
	chleb: osad/ bread: sludge 1:1	chleb spleśniały: osad/moldy bread: sludge 1:1	trawa świeża: osad/fresh grass: sludge 1:9	słoma: osad/ straw: sludge 1:2	wytłoki z rzepaku/bagasse from rape 1:9
SBP [m <sup>3</sup> /t]	490	610	955	360	742
E [MWh]	3,2	4,0	6,2	2,2	4,8

SBP – objętość biogazu wytworzona przez 1 t suchej masy organicznej mieszanki wsadowej, E – teoretyczna ilość energii jaką można uzyskać w oczyszczalni „Swarzewo” z 1 t mieszanki wsadowej [kWh]/SBP – volume of biogas generated by 1 t dry mass of organic batch, E – theoretical amount of energy that can be obtained in the „Swarzewo” treatment plant with 1 t batch mix [kWh]

Źródło: badania własne

Source: own study



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	x
<b>N [t]</b>	56	22	6	78	10	68	32	42	32+x	2
<b>P [t]</b>	18	11	3	29	1	28	31	---	31+x	0,9
<b>C [t]</b>	358	618	540	555	65	490	780	250	780	----

Rysunek 1. Obieg fosforu, azotu i węgla w biologicznej oczyszczalni ścieków.

Figure 1. Phosphorus, nitrogen and carbon cycle in a biological wastewater treatment plant

Źródło: opracowanie własne

Source: own study

kompoście związana jest w postaci fosforanu żelaza. Aby ograniczyć emisję fosforu do Morza Bałtyckiego, fosforany są strącane chemicznie solami żelaza (ze strumienia oznaczonego na schemacie jako P5) i wraz z masą osadową gromadzone w kompoście. Fosforan żelaza jest trudno dostępną formą dla roślin, co ogranicza jego użyteczność nawozową. W oczyszczalniach ścieków coraz częściej stosowane jest strącanie fosforu w postaci fosforanu amonowo-magnezowego (struwitu), który jest związkiem o bardzo dobrych właściwościach nawozowych. Dzięki tej technologii wzrasta stopień recyklingu zarówno fosforu, jak i azotu, dzięki czemu można zwiększyć zawartość tych pierwiastków w uzyskanym nawozie (strumień N9,P9).

W wyniku fermentacji metanowej usuwane jest 421 t węgla organicznego w postaci biogazu, co stanowi 43% masy węgla poddanego fermentacji. Nieznaczące ilości azotu (1,2 t/rok), fosforu (1,2 t/rok) oraz węgla (48 t/rok) odprowadzane są z oczyszczalni wraz z odpływem oczyszczonych ścieków. Pozostała masa analizowanych pierwiastków biogenicznych jest odprowadzana do atmosfery w trakcie procesów tlenowego oczyszczania ścieków i kompostowania.

### Podsumowanie

Materia organiczna, która powinna podlegać recyklingowi organicznemu w świetle gospodarki o obiegu zamkniętym jest przetwarzana w trzech głównych strumieniach odpadowych: materia organiczna stanowiąca pokarm i po procesie trawienia trafiająca do ścieków, odpady kuchenne (z grupy odpadów komunalnych) trafiające do śmieci i odpady roślinne, stanowiące margines produkcji rolniczej. Oczyszczalnia z biogazownią i kompostownią może przyczynić się do wzrostu wymaganego przez EU stopnia redukcji odpadów biodegradowalnych i zamknięcia części strumieni odpadowych. Oczyszczalnia „Swarzewo” w pełni przetwarza związki organiczne zawarte w strumieniu ściekowym. W zlewni oczyszczalni ścieków w Swarzewie, odpady kuchenne ulegające biodegradacji generowane są w ilości ok 6,4 t/rok. W oczyszczalni przetwarzane jest zaledwie 0,4% tej masy, pozostała część trafia do spalarni i na wysypiska. Również poprodukcyjne odpady rolnicze są przetwarzane w znikomych ilościach (700 t/rok), pomimo że biogazownia i kompostownia przy oczyszczalni w Swarzewie są zdolne przyjąć 26.000 t odpadów organicznych/rok. Bezwzględnym warunkiem recyklingu organicznego jest segregacja odpadów u źródła wytwarzania. Obecnie można założyć, że materia organiczna generowana przez mieszkańców terenu zlewni oczyszczalni podlega w 60% procesowi recyklingu organicznego, dzięki pracy komory fermentacyjnej i kompostowni. Gdyby szczegółową segregacją „u źródła” objęty był cały strumień biodegradowalnych odpadów kuchennych, udział recyklingu mógłby wzrosnąć do 90%, co zbliżyłoby realizowaną w regionie gospodarkę odpadami do modelu gospodarki o obiegu zamkniętym.

### Literatura/Bibliography

- Błaszczyk-Pasteczka Agata, Witold Żukowski. 2007. Energetyczne wykorzystanie biogazu (Biogas use as an energy source). *Czasopismo Techniczne. Chemia* 1: 11-17.
- Daniel Zbigniew, Tadeusz Juliszewski, Zbigniew Kowalczyk, Mateusz Malinowski, Zygmunt Sobol, Paulina Wrona. 2012. Metoda szczegółowej klasyfikacji odpadów z sektora rolniczego i rolno-spożywczego (Metoda szczegółowej klasyfikacji odpadów z sektora rolniczego i rolno-spożywczego). *Infrastruktura i Ekologia Terenów* 2 (4): 141-152.
- Dereszewska Alina, Renata Korzeniowska-Ginter. 2016. Ocena przydatności odpadów piekarskich do zintensyfikowania procesów fermentacji i denitryfikacji w komunalnej oczyszczalni ścieków (The evaluation of the bakery waste suitability for intensification of fermentation and denitrification processes in the municipal sewage treatment plant). *Roczniki Naukowe SERiA XVIII* (4): 49-54.
- Goliński Paweł, Wojciech Jokś. 2007. Właściwości chemiczne i biologiczne traw a produkcja biogazu (Chemical and biological properties of grasses and biogas production). *Łąkarstwo w Polsce* 10: 37-47.

- KE (Komisja Europejska). 2015. *Closing the loop. An EU action plan for the circular economy. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*. COM/2015/614 final. Brussels: European Commission.
- Szatkowska Beata, Bjarne Paulsrud, Andrzej Tonderski. 2014. Ocena potencjału biogazowego odpadów organicznych w województwie pomorskim. [W] *Ekoenergetyka. Biogaz: badania, technologie, prawo i ekonomika w rejonie Morza Bałtyckiego* (Assessment of biogas potential of organic waste in the Pomeranian Voivodship. [In] *Ecoenergy. Biogas: research, technologies, law and economics in the Baltic Sea region*), ed. A. Cenian, J. Gołaszewski, T. Noch, 19-21. Gdańsk: Wydawnictwo Gdańskiej Szkoły Wyższej.
- Ustawa o odpadach z 2001 roku* (The Waste Act of 2001, consolidated text). Dz.U. 2010.185.1243, tekst jedn.
- Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu* (The Act of 10 July 2007 on fertilizers and fertilization). Dz.U. 2007. 147.1033 z późn. zm.
- Ustawa z dnia 19 sierpnia 2011 r. o zmianie ustawy – Prawo energetyczne oraz niektórych innych ustaw* (The Act of 19 August 2011 amending the Act – Energy Law and some other acts.). Dz.U. 2011.205.1208.

### Summary

*The article discusses the procedures of agricultural waste management in the context of the principle of maximum closed loop for organic compounds. The concept of regional agro-waste economy is presented taking into account existing technological solutions including agricultural biogas plants as well as biogas plants located at sewage treatment plants. The biogas potential for agricultural waste co-fermented with primary sludge of the 'Swarzewo' wastewater treatment plant was estimated.*

Adres do korespondencji  
dr inż. Alina Dereszewska (orcid.org/0000-0003-0686-7177)  
Akademia Morska w Gdyni  
Katedra Towaroznawstwa Przemysłowego i Chemii  
ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia  
tel. (58) 558 66 63  
e-mail: a.dereszewska@wpit.am.gdynia.pl