

Biometanizacja metodą zrównoważonej użytkowania odpadów

*Magdalena Lebiocka, Artur Pawłowski
Politechnika Lubelska*

1. Wstęp

Za zrównoważony uznaje się taki typ rozwoju, „który gwarantuje zaspokojenie potrzeb obecnych pokoleń, nie zagrażając zdolności przyszłych pokoleń do zaspokajania własnych potrzeb” [12]. Z definicji tej wynika, że rozwój gospodarczy i cywilizacyjny obecnego pokolenia nie powinien odbywać się kosztem wyczerpywania zasobów nieodnawialnych i niszczenia środowiska dla dobra przyszłych pokoleń, które też będą posiadały prawa do swego rozwoju. Jest to zarazem swoisty imperatyw etyczny, odnoszący się do warunków bytowania człowieka, zwykle rozpatrywany w kontekście uwarunkowań ekologicznych, społecznych i ekonomicznych [13].

W ramach tej pierwszej grupy problematycznej szczególne wyzwanie stanowi szybko rosnąca ilość produkowanych przez człowieka odpadów. Wprowadzone działania zaradcze obejmują przyjęcie bardziej rygorystycznego prawa ochrony środowiska, które wymusiło na zakładach przemysłowych konieczność ograniczania ilości wytwarzanych odpadów, ich utylizację i zagospodarowanie [4, 5, 19].

Wśród konkretnych przyjmowanych w ramach inżynierii środowiska rozwiązań warto wskazać na będącą przedmiotem analizy w tym artykule biometanizację. Proces ten pozwala na wytwarzanie z odpadów znacznej ilości nośnika energii, jakim jest biogaz, który łatwo daje się przetworzyć na inne użytkowe formy energii. Z perspektywy zrównoważonego rozwoju oznacza to realizację ważnych celów: spowolnienie wyczerpywania paliw kopalnych, a także zmniejszenia powierzchni ziemi przeznaczonej na składowanie odpadów.

2. Uwarunkowania biometanizacji

W 2007 roku zebrano w Polsce ogółem ok. 10 mln ton odpadów (tabela 1), z czego ponad 9 mln ton zostało zdeponowanych. Ponadto funkcjonuje 929 składowisk odpadów o łącznej powierzchni 3085,6 ha, z czego w roku 2007 tylko 2,3 ha zostało poddane rekultywacji [11]. Składowanie polega na systematycznym deponowaniu złożonej mieszaniny odpadów często zawierającej substancje toksyczne, czemu towarzyszy niekontrolowana emisja biogazu.

Tabela 1. Odpady komunalne zebrane i unieszkodliwione w 2007 r. [11]

Table 1. Municipal solid waste collected and utilized in 2007 [11]

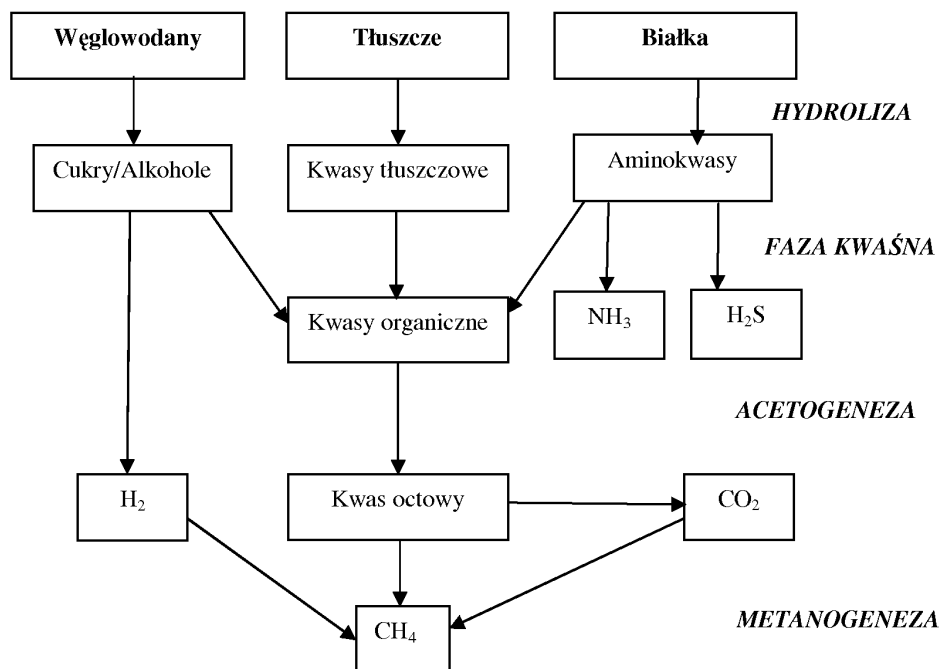
	Odpady [tys. ton]				
	Ogólnie	Unieszkodliwione		Wysegregowane	Zdeponowane
		Termicznie	Biologicznie		
Polska	9750	41	278	153	9098
Lubelskie	358	-	5	6	347
Zachodniopomorskie	501	-	22	-	479

Badania przeprowadzone przez Wuebbles'a [17] pokazują, że produkcja metanu podczas beztlenowej biodegradacji odpadów na składowisku i osadów w oczyszczalniach ścieków jest znaczącym źródłem jego emisji do atmosfery i stanowi odpowiednio 13 i 10% jego rocznej produkcji. Co więcej, metan oraz ditlenek węgla (główne składniki biogazu) są zaliczane do gazów powodujących efekt cieplarniany, dlatego też biogaz powinien być ujmowany w sposób kontrolowany [8]. Z uwagi na ciągle rosnącą liczbą czynnych i stale niską powierzchnią składowisk poddanych rekultywacji powinny być brane pod uwagę metody takie, jak fermentacja, kompostowanie i spalanie. Ze względu na duże ilości osadów wytwarzanych w oczyszczalniach ścieków oraz znaczną ilość działających zamkniętych komór fermentacyjnych problem intensyfikacji procesu biometanizacji i zwiększenia jego efektywności wydaje się być szczególnie istotnym [16].

Zawarta w odpadach materia organiczna podlega procesowi biometanizacji z wydzieleniem biogazu, który zazwyczaj zawiera 40÷70% metanu. Z uwagi na wysoką kaloryczność biogazu może on stanowić źródło energii do produkcji ciepła lub elektryczności.

Materia organiczna może ulegać biodegradacji zarówno w warunkach naturalnych jak i technicznych. Biometanizacja definiowana jest jako proces przekształcania złożonej materii organicznej głównie do metanu i ditlenku węgla w warunkach beztlenowych. Fermentacja metanowa wymaga aktywności różnorodnych populacji mikroorganizmów, które są odpowiedzialne za przebieg

procesu podczas poszczególnych jego faz [1]. W następstwie przemian substancji organicznej można mówić o następujących fazach biodegradacji (rys. 1):



Rys. 1. Ścieżki rozkładu beztlenowego [18]

Fig 1. Anaerobic digestion pathways [18]

Faza I – hydroliza, podczas niej złożone związki organiczne tj. węglowodory, białka, tłuszcze ulegają hydrolizie przy katalitycznym udziale enzymów. Produktami tej fazy są głównie cukry proste, glicerol, wyższe kwasy tłuszczowe oraz aminokwasy.

Faza II – fermentacja kwaśna. W trakcie trwania tej fazy produkty hydrolizy przetwarzane są przez bakterie acidogenne do kwasów organicznych (mrówkowego, octowego, propionowego, masłowego), alkoholi (metanolu, etanolu), wodoru i dwutlenku węgla.

Faza III – acetogeneza, podczas niej powstaje kwas octowy. Rozkład kwasów tłuszczowych, kwasów organicznych i alkoholi powoduje uwalnianie wodoru.

Faza IV – metanogeneza, bakterie przetwarzają produkty faz poprzednich do metanu, ditlenku węgla i wody.

3. Optymalizacja procesu fermentacji metanowej

Alternatywnym rozwiązaniem dla biometanizacji jest kofermentacja (współfermentacja), czyli fermentacja co najmniej dwóch składników pochodzących z różnych źródeł [3]. Proces ten z ekologicznego i ekonomicznego punktu widzenia jest bardziej korzystny niż fermentacja jednoskładnikowa. Najbardziej odpowiednimi komponentami do współfermentacji są: osady ściekowe, frakcja organiczna odpadów komunalnych i gnojowica. Biokomponenty, które można poddać procesowi współfermentacji oraz wydajność metanu z niektórych typów odpadów przedstawiono w tabelach 2 i 3 [2, 7, 9].

Tabela 2. Zalecane i mniej korzystne komponenty do procesu współfermentacji [2]

Table 2. Advantageous and poor components for co-fermentation process [2]

Substrat	Bardzo dobrze	Dobrze	Dostatecznie
Biogenne materiały pochodzenia rolniczego: – słoma i pozostałości roślin włóknistych – rośliny zielone, uprawy, ziarna, kiszonki		+	+
Pozostałości po żniwach		+	
Gnojowica		+	
Drożdże i produkty drożdżopodobne	+		
Owoce, kukurydza, ziemniaki – skóra, ziarna	+		
Odpady zwierzęce i pochodzące z rzeźni: – tłuszcz zwierzęcy – krew – odpady rybne – odpady drobiowe	+	+	
Odpady z produkcji tłuszczu roślinnych i zwierzęcych: – rozpuszczony olej roślinny – tłuszcze – osad z olei jadalnych – osad z tłuszczu jadalnych	+	+	
Pulpa I przemysł papierniczy		+	
Osad z produkcji żelatyny	+		
Osad z produkcji krochmalu	+		
Pozostałości z produkcji skrobi ziemniaczanej	+		
Pozostałości z produkcji skrobi kukurydzianej	+		
Pozostałości z produkcji skrobi ryżowej	+		
Odpady z przemysłu spożywczego		+	

Biorąc pod uwagę bardzo duże ilości osadów ściekowych wytwarzanych w oczyszczalniach ścieków oraz liczbę funkcjonujących WKF-ów, współfermentacja osadów z innym typem odpadów organicznych jest bardzo korzystna. Fermentacja metanowa samych osadów ściekowych może być trudna ze względu na ich charakterystykę tj. niska wartości stosunku C:N, niska zawartości suchej masy. Natomiast frakcja organiczna odpadów komunalnych ze względu na swój skład wymaga bardziej złożonych procesów jednostkowych, aby zostać przekształcona do metanu. Wysoka zawartość suchej masy, duża wartość stosunku C:N, deficyt substancji odżywczych, zawartość substancji toksycznych (metale ciężkie, ftalany) może powodować, że fermentacja samych tylko odpadów będzie bardzo trudnym procesem ze względów technicznych i technologicznych. Z drugiej strony frakcja organiczna odpadów komunalnych zawiera dużą ilość łatwobiodegradowalnej substancji organicznej, czego rezultatem jest wydajność metanu osiągająca do 240 dm³/kg usuniętej suchej masy. Proponowana współfermentacja osadów ściekowych i frakcji organicznej odpadów komunalnych jest alternatywą dla klasycznego układu fermentacji.

Tabela 3. Wydajność metanu z niektórych typów odpadów [7]

Table 3. Methane yield from some waste types [7]

Rodzaj odpadów	Zawartość substancji organicznej [%]	Wydajność metanu [dm ³ /kg]
Odpady z gospodarstw domowych	20÷30	150÷240
Osad ściekowy	3÷4	17÷22
Zagęszczony osad ściekowy	15÷20	85÷110
Treść żołądkowa i jelitowa	15÷20	40÷60
Osady oleju rybnego	80÷85	450÷600
Zaolejony bentonit	40÷45	350÷450
Serwatka	7÷10	40÷55
Olej spożywczy/margaryna	90	240

Rozważając problemy związane z klasyczną fermentacją substancji pochodzącej z jednego źródła, współfermentacja wydaje się być obiecującym rozwiązaniem. Zalety procesu współfermentacji obejmują:

- rozcieńczenie substancji toksycznych zawartych w substancjach poddawanych procesowi współfermentacji,
- zwiększenie ilości substancji odżywczych,
- uzyskanie większej produkcji biogazu oraz zwiększenie ilości biodegradowalnej substancji organicznej,
- uzyskanie wysokiego stopnia przefermentowania.

4. Oszacowanie ilości energii możliwej do uzyskania z współfermentacji frakcji organicznej odpadów i osadów ściekowych dla miasta Lublin

Dla zobrazowania korzyści wynikających ze współfermentacji wykonano obliczenia pozwalające oszacować ilość energii, jaka możliwa jest do uzyskania ze współfermentacji osadów ściekowych produkowanych w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków „Hajdów” oraz frakcji organicznej odpadów zdeponowanych na Składowisku Odpadów „Rokitno”. Oczyszczalnia ścieków i składowisko przyjmują ścieki i odpady pochodzące z terenu miasta Lublina. Oszacowanie przeprowadzono na podstawie danych empirycznych zawartych w zestawieniu Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska z roku 2008 oraz danych podanych przez Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w Lublinie [10, 14].

Założenia:

Średni dobowy przepływ ścieków przez oczyszczalnię $Q_{dsr} = 120000 \text{ m}^3/\text{d}$,

Zawartość zawiesin w ściekach dopływających do oczyszczalni $Z = 285 \text{ g/m}^3$,

Stężenie BZT₅ w ściekach dopływających do oczyszczalni $S_{BZT_5} = 296 \text{ g/m}^3$,

Sprawność części mechanicznej względem usuwania zawiesiny ogólnej $\eta_{zaw} = 0,65$,

Sprawność części mechanicznej względem usuwania BZT₅ $\eta_m = 0,3$,

Sprawność części biologicznej względem usuwania BZT₅ $\eta_b = 0,9$,

Przyrost osadu $\Delta m = 0,6$.

Ilość osadu wydzielonego w osadnikach wstępnych:

$$G_1 = Q \cdot Z \cdot \eta_{zaw} \quad [\text{kg/d}] \quad (1)$$

$$G_1 = 120000 \cdot 0,285 \cdot 0,65 = 22230 \quad [\text{kg/d}]$$

$$V_1 = \frac{G_1}{10 \cdot (100 - W_1)} \quad [\text{m}^3/\text{d}] \quad (2)$$

$$V_1 = \frac{22230}{10 \cdot (100 - 96)} = 555,8 \quad [\text{m}^3/\text{d}]$$

W_1 – uwodnienie osadu wstępnego, 96%

Ilość osadu wydzielonego w osadnikach wtórnych:

$$G_2 = Q \cdot S_{BZT_5} \cdot (1 - \eta_m) \cdot \eta_b \cdot \Delta m \quad [\text{kg/d}] \quad (3)$$

$$G_2 = 120000 \cdot 0,296 \cdot (1 - 0,3) \cdot 0,9 \cdot 0,6 = 13427 \quad [\text{kg/d}]$$

Na podstawie wzoru 2 obliczono objętość osadu po osadnikach wtórnych

$$V_2 = \frac{11863}{10 \cdot (100 - 99)} = 1342,7 \text{ [m}^3\text{/d]}$$

W_2 – uwodnienie osadu wtórnego, 96%.

Ilość osadu wstępnego po zagęszczeniu:

Określa się ją na podstawie wzoru 2, uwzględniając zmniejszenie uwodnienia. Dla osadu wstępnego zagęszczanego grawitacyjnie przyjęto, że uwodnienie wynosi 95%.

$$V'_1 = \frac{22230}{10 \cdot (100 - 95)} = 444,6 \text{ [m}^3\text{/d]}$$

Ilość osadu wtórnego po zagęszczeniu:

Uwodnienie przyjęto równe 96%.

$$V'_2 = \frac{13427}{10 \cdot (100 - 96)} = 335,7 \text{ [m}^3\text{/d]}$$

Ilość osadu doprowadzanego do WKF:

Objętość osadu mieszanego

$$W_m = \frac{V'_1 \cdot W'_1 + V'_2 \cdot W'_2}{V'_1 + V'_2} \text{ [%]} \quad (4)$$

$$W_m = \frac{444,6 \cdot 95 + 335,7 \cdot 96}{444,6 + 335,7} = 95,4 \text{ [%]}$$

$$G_m = G_1 + G_2 \text{ [kg/d]}$$

$$G_m = 22230 + 13427 = 35657 \text{ [kg/d]}$$

$$V_m = \frac{35657}{10 \cdot (100 - 95,4)} = 775,2 \text{ [m}^3\text{/d]} = 282948 \text{ [m}^3\text{/a]}$$

Masa organiczna osadów:

Masę organiczną osadów obliczono na podstawie wzoru 5, zakładając $\rho_{os}=1020 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{wody}=1000 \text{ kg/m}^3$,

$$m_{os} = (\rho_{os} - \rho_{wody}) \cdot V_m \text{ [kg]} \quad (5)$$

$$m_{os} = (1020 - 1000) \cdot 282948 = 5659 \cdot 10^3 \text{ [kg]} = 5659 \text{ [Mg]}$$

Ilość odpadów zdeponowanych na Składowisku Odpadów Rokitno w 2007 r. wynosiła 120041,28 Mg.

Według tabeli 3 zawartość substancji organicznej w odpadach komunalnych stanowi 20-30%, do dalszych obliczeń przyjęto zawartość organiki na poziomie 30%.

$$m_{odp} = 120041,28 \cdot 0,3 = 36012,4 \text{ [Mg]}$$

Ponieważ obliczona masa odnosi się do masy odpadów wilgotnych, należy wyznaczyć masę odpadów suchych uwzględniając ich uwodnienie. Uwodnienie osadów według danych literaturowych wynosi 20% [15].

$$m_{odp_s} = (1 - W) \cdot m_{odp} \text{ [Mg]} \quad (6)$$
$$m_{odp_s} = (1 - 0,2) \cdot 36012,4 = 28809,9 \text{ [Mg]}$$

Objętość powstającego metanu w ciągu roku obliczono wykorzystując wydajność metanu dla odpadów i osadów podaną w tabeli 3. W związku z tym, że najlepsze efekty procesu współfermentacji otrzymuje się gdy wagowy stosunek odpadów do osadów ściekowych wynosi 80:20 [6], do dalszych obliczeń przyjęto, że masa odpadów stanowiąca 80% wynosi 21643,2 [Mg], 20% stanowi całkowita masa wydzielonych osadów.

$$V_{CH_4_{odp}} = 200 \cdot 21643,2 = 4,33 \cdot 10^6 \text{ [m}^3 \text{ CH}_4\text{]}$$

$$V_{CH_4_{osad}} = 90 \cdot 5659 = 5,1 \cdot 10^5 \text{ [m}^3 \text{ CH}_4\text{]}$$

Ilość metanu powstająca podczas współfermentacji odpadów i osadów wynosi:

$$V_{CH_4} = 4,33 \cdot 10^6 + 5,1 \cdot 10^5 = 4,84 \cdot 10^6 \text{ [m}^3 \text{ CH}_4\text{].}$$

Potencjalna ilość energii chemicznej gazu została obliczona na podstawie wzoru 7. Wartość opalową (W_d) metanu przyjęto równą 35897 kJ/m³.

$$E = W_d \cdot V_{CH_4} \text{ [J]} \quad (7)$$
$$E = 35897 \cdot 4,84 \cdot 10^6 = 173741,5 \text{ [MJ]} = 48,3 \text{ [MWh]}$$

5. Podsumowanie

Fermentacja metanowa mieszaniny odpadów i osadów ściekowych jest bardzo dobrą alternatywą dla fermentacji jednoskładnikowej. Stanowi zarazem przykład na to, jak wiedza z zakresu inżynierii środowiska może służyć do realizacji zasady zrównoważonego rozwoju we współczesnym świecie. Eliminuje

jąc ze środowiska zanieczyszczenia i ograniczając jego degradację czyni je zdolnym do podtrzymania życia następnych pokoleń. W tym kontekście należy wskazać w szczególności na następujące zagadnienia:

- Biometanizacja jest ważnym aspektem odnoszącym się do problematyki podaży nośników energii. Prowadzi do przekształcenia energii zawartej w biomacie w użyteczne paliwo (biogaz). Tym samym przyczynia się do spowolnienia zużycia paliw kopalnych (w tym gazu ziemnego), poprawiając bilans energetyczny kraju i zmniejszając niekontrolowaną emisję biogazu do atmosfery.
- Ponadto przefermentowana masa może stanowić cenny nawóz.
- Istotną zaletą współfermentacji jest także zmniejszenie liczba niezbędnych składowisk odpadów, co jest istotnym zagadnieniem w aspekcie ochrony powierzchni ziemi.

Literatura

1. **Angelidaki I., Sanders W.:** *Assessment of the anaerobic biodegradability of macro-pollutants*. Reviews in Environmental Science and Biotechnology 3(2), 117-129, 2004.
2. **Braun R., Brachtl E. and Grasmug M.:** *Codigestion of proteinaceous industrial waste*. Applied Biochemistry and Biotechnology 109, 139-153, 2003.
3. **Cecchi F., Pavan P. and Mata-Alvarez J.:** *Anaerobic co-digestion of sewage sludge: application to the macroalgae from the Venice lagoon*. Resources, Conservation and Recycling 17, 57-66, 1996.
4. **De Feo G., Malvano C.:** *The use of LCA in selecting the best MSW management system*, Waste Management (2009), doi:10.1016/j.wasman.2008.12.021, 2009.
5. **El Haggag S.:** *Sustainable Industrial Design and Waste Management*, Elsevier Academic Press, London 2007.
6. **Hamzawi N., Kennedy K.J and McLean D.D.:** *Anaerobic digestion of co-mingled municipal solid waste and sewage sludge*. Water Science and Technology 38(2), 127-132, 1998.
7. **Ledakowicz S., Krzystek L.:** *Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego*. Biotechnologia 3(70), 165-183, 2005.
8. **Milich L.:** *The role of methane in global warming: where might mitigation strategies be focused?* Global Environment Change 9, 179-201, 1999.
9. **Montusiewicz A., Lebiocka M., Pawłowska M.:** *Characterization of the biometanization process in selected waste mixtures*. Archives of Environmental Protection 34(3), 49-61, 2008.
10. MPWiK Lublin: <http://www.mpwik.lublin.pl/> (21.02.2009).
11. *Ochrona Środowiska 2008*, Główny Urząd Statystyczny, Departament Badań Regionalnych i Środowiskowych, Warszawa 2008.
12. *Our Common Future, The Report of the World Commission on Environment and Development*, Oxford University Press, New York 1987.
13. **Pawłowski A.:** *Rozwój zrównoważony – idea, filozofia, praktyka*. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, vol. 51, Komitet IŚ, Lublin 2008.

14. *Raport o stanie środowiska naturalnego województwa lubelskiego w latach 2006-2007*. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Lublin 2008.
15. **Rosik-Dulewska C.:** *Podstawy gospodarki odpadami*. PWN, Warszawa 2000.
16. **Scharff H. and Jacobs J.:** *Applying guidance for methane emission estimation for landfills*. Waste Management 26, 417-429, 2006.
17. **Wuebbles D.J. and Hayhoe K.:** *Atmospheric methane and global change*. Earth-Science Reviews 57, 177-210, 2002.
18. **Zacharof A.I., Butler A.P.:** *Stochastic modelling of landfill leachate and biogas production incorporating waste heterogeneity. Model formulation and uncertainty analysis*. Waste Management, 24, 453-462, 2004.
19. **Zotos G., Karagiannidis A., Zampetoglou S., Malamakis A., Antonopoulos I.-S., Kantogianni S., Tchobanoglous G.:** *Developing a hostic strategy for integrated waste management within municipal planning: Challenges, policies, solutions and perspectives for Hellenic municipalities in zero-waste, low-cost direction*. Waste Management (), doi:10.1016/j.wasman.2008.11.016, 2009.

Biomethanization as a Method of Sustainable Utilization of Wastes

Abstract

Millions tones of waste are produced every year in Poland. Among them industrial waste, municipal solid waste and sewage sludge can be marked out. In decades-long time the main method of their utilization was dumping on the landfill sites. Growing production of wastes effects with using non-renewable resources and leave disadvantageous legacy to the future generations. The aim of sustainable waste management is to reduce, reuse and recycle of wastes. In this paper anaerobic digestion process was shown as a sustainable utilization method. A sustainable sewage and solid waste management is a difficult task from economical and technical point of view. However, biogas production – one of the accelerating sectors of renewable energy seems to be a promising solution. Since environmental regulations in the European Union are based on the concept of prevention and control of pollution, therefore waste-sludge management, waste disposal and environmental pollution are strictly linked. Biogas is formed as a product of the anaerobic digestion process and usually contains about 40-70% of methane. With regard to its high energetic value methane can be considered as a source of energy for producing heat or electricity. Alternative for anaerobic digestion could be co-digestion. This process makes conversion more profitable in comparison with one-source waste. In this study an amount of energy which can be obtain during co-digestion of solid waste and sewage sludge was estimated.