

PRODUKCJA ENERGII Z ODPADÓW

Centrum Badań i Innowacji
PRO-AKADEMIA



PAN

POLSKA AKADEMIA NAUK



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Łódzkie

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Publikacja powstała w ramach projektu „Bioenergia dla Regionu – Zintegrowany Program Rozwoju Doktorantów”
Projekt i publikacja współfinansowane ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego
Publikacja bezpłatna
Łódź 2012

RECENZENT: prof. dr hab. inż. **Stanisław Ledakowicz**

AUTORZY: mgr **Magdalena Łysek**, Uniwersytet Łódzki, Wydział Prawa i Administracji
mgr inż. **Radosław Ślęzak**, Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

OPRACOWANIE REDAKCYJNE: **Bogusław Pielat**

© Copyright by Centrum Badań i Innowacji Pro-Akademia, 2012
© Copyright for this edition by Oddział Polskiej Akademii Nauk w Łodzi, 2012

Pro-Akademia ISBN 978-83-63704-00-1
PAN ISBN 978-83-86492-63-3

Spis treści

Część I – Uwarunkowania administracyjno-prawne gospodarki odpadami	5
Wstęp	5
1. Pojęcie odpadu	6
2. Polityka UE w zakresie zagospodarowania odpadów	9
2.1. Zasada „zanieczyszczający płaci”	9
2.2. Prawo gospodarowania odpadami w Unii Europejskiej	10
2.3. Cele UE w zakresie zagospodarowania poszczególnych kategorii odpadów.....	14
3. Polski system gospodarki odpadami	17
4. Energia z odpadów jako Odnawialne Źródło Energii	19
Podsumowanie.....	24
Literatura	25
Część II – Uwarunkowania techniczne gospodarki odpadami.....	27
Wstęp	27
1. Opis procesów zachodzących w odpadach	28
2. Efekt cieplarniany oraz właściwości metanu	33
3. Symulacja składowisk w lizymetrach.....	33
4. Metody przyspieszania procesów na składowiskach	34
4.1. Recykulacja odcieków	34
4.2. Napowietrzanie odpadów	37
5. Opis systemu odgazowywania	40
6. Metody unieszkodliwiania powstającego biogazu.....	42
6.1. Spalanie biogazu z produkcją energii.....	42
6.2. Spalanie biogazu bez produkcji energii.....	43
6.3. Produkcja biometanu	43
6.4. Utlenianie metanu w biofiltrze.....	44
7. Opis składowisk komunalnych w województwie łódzkim	44
8. Opis produkcji biogazu i energii ze składowisk odpadów komunalnych	50
Podsumowanie.....	57
Literatura	57

Część I

Uwarunkowania administracyjno-prawne gospodarki odpadami

„Za dwadzieścia lat bardziej będziemy żalować tego,
czego nie zrobiliśmy, niż tego, co zrobiliśmy”
Mark Twain

Wstęp

Celem polityki Unii Europejskiej jest zapewnienie wysokiej jakości życia i zdrowia ludzi ją zamieszkujących poprzez skuteczną ochronę środowiska. Polityka unijna opiera się na przekonaniu, że wysokie standardy ekologiczne stymulują innowacje i przynoszą wymierne korzyści ekonomiczne. Obowiązujący do końca roku 2012 Szósty Program Działań Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska *Środowisko 2010 „Nasza przyszłość, nasz wybór”* podkreśla konieczność działań UE w obszarach zmian klimatycznych, ochrony środowiska naturalnego i różnorodności biologicznej, zdrowia i jakości życia oraz zarządzania zasobami naturalnymi i gospodarki odpadami [9]. W celu realizacji tych działań przyjęto zasadę dążenia do uwzględniania potrzeb ochrony środowiska we wszystkich sferach unijnej polityki, wsparcia podmiotów na rzecz poprawy stanu środowiska (bliska współpraca z biznesem i konsumentami dla znalezienia optymalnych rozwiązań) oraz zapewnienia lepszej, łatwiej dostępnej informacji na temat środowiska wszystkim obywatelom Unii. W ramach działań dotyczących gospodarki odpadami w programie szczególną uwagę zwraca się na racjonalne gospodarowanie odpadami, ponowne ich wykorzystanie i sposób unieszkodliwiania. Unia Europejska planuje działania w zakresie redukcji odpadów przeznaczonych do „końcowego” składowania o blisko 50% do roku 2050. Wzrost liczby ludności Europy powoduje zwiększenie ilości odpadów.

Unieszkodliwianie takiej ilości produktów odpadowych za pomocą najpopularniejszych dotąd metod, takich jak składowanie czy spalanie w gospodarstwach domowych, wiąże się z zanieczyszczeniem wód i skażeniem gleb, powstawaniem problemów zdrowotnych na skutek emisji pyłów i gazów oraz ze zmianami klimatycznymi. Program „*Nasza przyszłość, nasz wybór*” wzywa do opracowania środków dotyczących zapobiegania powstawania odpadów i gospodarowania nimi. Wymaga stosowania środków mających zapewnić segregację u źródła, zbieranie selektywne oraz recykling priorytetowych strumieni odpadów, promując ideę „społeczeństwa recyklingu”. Odpady powinny być przygotowane do ponownego użycia, jeżeli jest to wykonalne technicznie, ekonomicznie i z punktu widzenia środowiska, zanim zostaną poddane odzyskowi.

1. Pojęcie odpadu

Odpady są jednym z istotniejszych zagrożeń dla środowiska chociażby z uwagi na problemy związane zarówno z prewencją, jak i późniejszym z nimi postępowaniem. Zjawisko powstawania odpadów i specyfika zagrożeń powiązana z tym skłania ustawodawców do wyodrębnienia wspomnianej problematyki z ogólnej regulacji dotyczącej ochrony środowiska i w przypadku uznania danego przedmiotu lub substancji za odpad powoduje zastosowanie odrębnego reżimu prawnego. Zakładać on powinien odpowiedzialność za odpad w każdym stadium. Jednak aby było to możliwe należy stworzyć jasną definicję odpadu [13]. W rozumieniu dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylającej niektóre dyrektywy [6], odpad oznacza „każdą substancję lub przedmiot, których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć, lub do których pozbycia został zobowiązany”. Zasadne wydaje się podjęcie próby określenia cech odpadu. Na gruncie wcześniej obowiązujących przepisów w zakresie odpadów cechą charakterystyczną tego pojęcia była nieprzydatność w miejscu i w czasie, co powodowało wiele wątpliwości. Do kwestii tej odniósł się Naczelny Sąd Administracyjny w wyroku z dnia 18 marca 1991 r.¹ „Obowiązek likwidacji, unieszkodliwienia lub gromadzenia odpadów w miejscach wyznaczonych na ten cel w planach zagospodarowania przestrzennego, nałożony na wytwórcę substancji uciążliwych dla środowiska [...] odnosi się nie tylko do odpadów, które ze względu na swą właściwość są w ogóle nieprzydatne gospodarczo, lecz także do substancji uciążliwych dla

¹ IV S.A. 1073/90, ONSA 1992/3–4, poz. 57.

środowiska nadających się do gospodarczego wykorzystania, jeżeli z określonych powodów (np. okresowego braku zapotrzebowania, braku właściwej technologii itp.) nie mogą być wykorzystywane równoległe z ich powstawaniem”. Można zgodzić się z Janem Jerzmańskim, który odnosząc się do tego wyroku, zauważył, że sąd wskazał dwie ważne przesłanki – technologiczną i handlową (ekonomiczną) nieprzydatności, umożliwiające uznanie danej substancji lub przedmiotu za odpad. W doktrynie powstawały wątpliwości na temat subiektywnego bądź obiektywnego ujmowania cechy nieprzydatności. Obowiązująca ustawa o odpadach wątpliwości te w pewnym stopniu rozwiała, nie definiując jednak kluczowego w tym zakresie pojęcia „pozbywania się”, co ma ścisły związek z nieprzydatnością i przychyliła się tym samym do argumentów zwolenników traktowania tych pojęć w sposób subiektywny. Decydujące znaczenie przy określeniu nieprzydatności odpadu będzie miało ustalenie woli posiadacza, a zatem odpad powstaje z chwilą, gdy władający przedmiotem nie znajduje dla niego zastosowania [13]. Ustawodawca spróbował ponadto określić, czym jest odpad poprzez stworzenie katalogu w postaci załącznika 1 do ustawy, który wyróżnia kilka kategorii odpadów. Jednakże ostatnia jego pozycja brzmi „Wszelkie substancje lub przedmioty, które nie zostały uwzględnione w powyższych kategoriach”, co pozostawia otwartą furtkę do innego sprecyzowania tego pojęcia. Warto zaznaczyć, że projekt nowej ustawy o odpadach [18] klasyfikuje odpady przez ich zaliczenie do odpowiedniej grupy, podgrupy i rodzaju odpadów, uwzględniając przy tym: źródło ich powstawania, właściwości powodujące, że odpady są odpadami niebezpiecznymi oraz składniki odpadów, w przypadku których przekroczenie wartości granicznych stężeń substancji niebezpiecznych może powodować, że odpady są odpadami niebezpiecznymi. Według nowej ustawy to minister właściwy do spraw środowiska miałby określić, w drodze rozporządzenia, katalog odpadów z podziałem na grupy, podgrupy i rodzaje, ze wskazaniem odpadów niebezpiecznych, kierując się przy tym źródłem powstawania odpadów oraz ich właściwościami określonymi w załączniku do ustawy.

Zgodnie z art. 3 ust. 3 obowiązującej ustawy o odpadach [28] możemy wyróżnić następujące odpady:

- *bioodpady* – ulegające biodegradacji odpady z terenów zieleni, odpady spożywcze i kuchenne z gospodarstw domowych, zakładów gastronomii, zakładów żywienia zbiorowego i jednostek handlu detalicznego, a także podobne ze względu na swój charakter lub skład odpady z zakładów produkujących bądź wprowadzających do obrotu żywność;
- *odpady komunalne* – odpady powstające w gospodarstwach domowych, z wyłączeniem pojazdów wycofanych z eksploatacji, a także odpady niezawierające odpadów nie-

bezpiecznych pochodzące od innych wytwórców odpadów, które ze względu na swój charakter lub skład są podobne do odpadów powstających w gospodarstwach domowych. Według projektu nowej ustawy o odpadach zmieszane odpady komunalne pozostają zmieszanymi odpadami komunalnymi, nawet jeżeli zostały poddane czynności przetwarzania odpadów, która nie zmieniła w sposób znaczący ich właściwości;

- *odpady medyczne* – odpady powstające w związku z udzielaniem świadczeń zdrowotnych oraz prowadzeniem badań i doświadczeń naukowych w zakresie medycyny;
- *odpady obojętne* – odpady, które nie ulegają istotnym przemianom fizycznym, chemicznym lub biologicznym; są nierozpuszczalne, nie wchodzi w reakcje fizyczne ani chemiczne, nie powodują zanieczyszczenia środowiska lub zagrożenia dla zdrowia ludzi, nie ulegają biodegradacji i nie wpływają niekorzystnie na materię, z którą się kontaktują; ogólna zawartość zanieczyszczeń w tych odpadach oraz zdolność do ich wymywania, a także negatywne oddziaływanie na środowisko odcieku muszą być nieznaczne, a w szczególności nie powinny stanowić zagrożenia dla jakości wód powierzchniowych, wód podziemnych, gleby i ziemi;
- *odpady ulegające biodegradacji* – odpady, które ulegają rozkładowi tlenowemu lub beztlenowemu przy udziale mikroorganizmów;
- *odpady weterynaryjne* – odpady powstające w związku z badaniem, leczeniem zwierząt lub świadczeniem usług weterynaryjnych, a także w związku z prowadzeniem badań naukowych i doświadczeń na zwierzętach;
- *odpady z wypadków* – odpady powstające podczas prowadzenia akcji ratowniczej lub gaśniczej, z wyłączeniem:
 - a) odpadów powstałych w wyniku poważnej awarii lub poważnej awarii przemysłowej,
 - b) odpadów powstałych w wyniku szkody w środowisku, o której mowa ustawie z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie [28];
- *odpady zielone* – stanowiące części roślin odpady komunalne pochodzące z pielęgnacji terenów zieleni (w projekcie nowej ustawy uzupełniono tę definicję także o odpady z ogrodów, parków i cmentarzy) oraz targowisk, z wyjątkiem odpadów pochodzących z czyszczenia ulic i placów.

Biorąc z kolei pod uwagę źródło pochodzenia, odpady możemy podzielić na dwie podstawowe grupy: odpady komunalne, powstające w wyniku bytowania człowieka i odpady przemysłowe, powstające w wyniku działalności gospodarczej. Natomiast w każdej z tych grup, biorąc pod uwagę szkodliwość, można wydzielić: odpady niebezpieczne, które ze względu na pochodzenie, skład chemiczny, biologiczny i inne właściwości stanowią zagrożenie dla życia bądź zdrowia ludzi i środowiska oraz odpady inne niż niebezpieczne.

2. Polityka UE w zakresie zagospodarowania odpadów

Unia Europejska nakłada na Polskę bardzo restrykcyjne zadania w zakresie kompleksowego zagospodarowania odpadów komunalnych². Artykuł 192.3 traktatu o funkcjonowaniu Unii Europejskiej (dawny artykuł 175 TWE) stanowi, iż nadrzędnym kierunkiem działania UE w dziedzinie środowiska jest: zachowanie, ochrona i poprawa jakości środowiska; ochrona zdrowia ludzkiego; ostrożne i racjonalne wykorzystywanie zasobów naturalnych oraz promowanie na płaszczyźnie międzynarodowej środków zmierzających do rozwiązywania regionalnych lub światowych problemów w dziedzinie środowiska, w szczególności zwalczania zmian klimatu. Dla tematyki pracy istotne znaczenie mają przepisy prawa Unii Europejskiej w zakresie rozwiązań szczegółowych dotyczących gospodarki odpadami. Wzrost liczby ludności Europy powoduje zwiększenie ilości odpadów. Zgodnie z art. 191 traktatu o funkcjonowaniu Unii Europejskiej (dawny artykuł 174 TWE) „Polityka Unii w dziedzinie środowiska stawia sobie za cel wysoki poziom ochrony, z uwzględnieniem różnorodności sytuacji w różnych regionach Unii. Opiera się na zasadzie ostrożności oraz na zasadach działania zapobiegawczego, naprawiania szkody w pierwszym rzędzie u źródła i na zasadzie »zanieczyszczający płaci«, która jest wiążącą zasadą na szczeblu europejskim i międzynarodowym”.

2.1. Zasada „zanieczyszczający płaci”

Zasada „zanieczyszczający płaci” została wprowadzona do praktyki ochrony środowiska przez Sejm w drodze uchwalonej w 1991 r. Polityki Ekologicznej Państwa. Artykuł 7 ustawy *Prawo ochrony środowiska* [25] konstytuuje tę zasadę, stanowiąc: „Kto powoduje zanieczyszczenie środowiska, ponosi koszty usunięcia skutków tego zanieczyszczenia. [...] Kto może spowodować zanieczyszczenie środowiska, ponosi koszty zapobiegania temu zanieczyszczeniu”. Zasada „zanieczyszczający płaci” (z ang. *Polluter Pays Principle, PPP*) oznacza, że sprawcy szkód w środowisku powinni ponosić koszty zapobiegania tym szkodom lub naprawiania ich skutków, dlatego też nazywana jest także zasadą odpowiedzialności sprawcy zanieczyszczenia [15]. Zasada ta ma zatem

² Ogólne programy działania określające cele priorytetowe, które mają być osiągnięte, uchwalane są przez Parlament Europejski i Radę, stanowiące zgodnie ze zwykłą procedurą ustawodawczą i po konsultacji z Komitetem Ekonomiczno-Społecznym oraz Komitetem Regionów.

charakter zarówno kompensacyjny, jak i prewencyjny. W aspekcie kompensacyjnym podmiot, który spowodował zanieczyszczenie środowiska, ponosi koszty usunięcia skutków tego zanieczyszczenia. Wskazać należy, że podmiot nie jest zobowiązany do restytucji, czyli przywrócenia stanu właściwego, a jedynie poniesienia kosztów naprawy. Oznacza to, że odpowiedzialność za ingerowanie w środowisko swoją działalnością spada na zanieczyszczającego (w tym odpowiedzialność za niezgodne z prawem gospodarowanie odpadami). W aspekcie prewencyjnym podmiot, którego działalność wiąże się z możliwością zanieczyszczenia środowiska, ponosi koszty zapobiegania temu zanieczyszczeniu. Zasada ta stosowana jest zwłaszcza w rozwiązaniach szczegółowych w prawie ochrony środowiska w sprawie odpowiedzialności cywilnej i administracyjnej [19], ale także jako odpowiedzialność finansowa, która oznacza, że zanieczyszczający musi znaleźć środki na sfinansowanie koniecznych działań ochrony środowiska. W przypadku odpadów komunalnych podjęcie tych koniecznych działań spada na gminę, która ustawowo zobowiązana jest do ochrony środowiska przed odpadami. Realizacja tej zasady jest ważna w kontekście dostosowania unormowań prawnych Polski do przepisów Unii Europejskiej, a co za tym idzie, możliwości dotowania zanieczyszczających, w celu dostosowania ich działalności do standardów wynikających z potrzeb ochrony środowiska. Zasada „zanieczyszczający płaci” jest jedną z podstawowych zasad polityki środowiskowej UE i jest powszechnie stosowana na terytorium Europy. Ogólny zakres stosowania tej zasady został wyznaczony przez Komunikat Komisji Europejskiej dotyczący ogólnych wskazówek do programów pomocowych, stanowiąc, że „należy dążyć do stworzenia systemu, w którym koszty środowiskowe związane z usuwaniem zanieczyszczeń i/lub działaniami zapobiegawczymi są ponoszone przez sprawców zanieczyszczeń. Stosowanie tej zasady musi być zgodne z celami spójności gospodarczej i społecznej, a także powinno się brać pod uwagę stopień społecznej akceptacji obciążania kosztami”. Ponadto zasada ta służy różnicowaniu proporcjonalnego udziału pomocy Wspólnoty w ramach Funduszu Spójności oraz Funduszy Strukturalnych, a zachęcenie do szerszego jej stosowania przyczynia się zarówno do bardziej efektywnego wykorzystania finansów publicznych, jak i do ochrony zasobów naturalnych.

2.2. Prawo gospodarowania odpadami w Unii Europejskiej

Za główny cel polityki UE w dziedzinie gospodarki odpadami przyjmuje się minimalizowanie ilości odpadów u źródła ich powstawania, poprzez stymulację popytu na produkty „ekologiczne” oraz stosowanie skuteczniejszych metod produkcji i odzysku odpa-

dów. Pozostałe odpady powinny być w bezpieczny sposób unieszkodliwiane, np. spalane w instalacjach termicznego przekształcania odpadów, a w ostateczności składowane. Prawo Unii Europejskiej dotyczące gospodarki odpadami jest dość bogate. Pierwsze dokumenty tworzące podstawy gospodarki odpadami w Unii Europejskiej powstały już w latach 70. wieku XX. Kwestie tę obecnie reguluje ponad kilkadziesiąt aktów, które dotyczą zwłaszcza wymagań ogólnych w stosunku do odpadów, w tym odpadów niebezpiecznych, spalania odpadów, składowania odpadów, wymagań szczegółowych w stosunku do poszczególnych grup odpadów, ewidencji, sprawozdawczości i przekazywania informacji oraz międzynarodowego obrotu odpadami [1].

Na podstawie Jednolitego Aktu Europejskiego (nowelizującego traktat rzymski) została opracowana przez Wspólnotę „Strategia gospodarki odpadami” („Waste Strategy”) w formie zalecenia Rady z 8 czerwca 1989 r. pn. Informacja Komisji do Rady i Parlamentu Europejskiego o strategii Wspólnoty w dziedzinie gospodarki odpadami. Strategię można uznać za jeden z ważniejszych dokumentów Unii Europejskiej dotyczący gospodarki odpadami, pomimo że nie miała charakteru bezwzględnie obowiązującego. Określała ona następujące zasady działania Wspólnoty w omawianym zakresie:

1. *Zapobieganie powstawaniu odpadów* na dwa sposoby: zapobieganie przez technologię (wspieranie „czystej produkcji”) oraz zapobieganie poprzez produkty, czyli promowanie produktów o „małej szkodliwości powstających z nich odpadów”;

2. *Odzysk* poprzez prace badawczo-rozwojowe prowadzone w dziedzinie technologii powtórnego wykorzystania i recyklingu, optymalizacji systemów zbierania i segregowania, zmniejszania kosztów zewnętrznych powtórnego wykorzystania i recyklingu odpadów oraz tworzenia rynków zbytu dla produktów wytwarzanych w procesie powtórnego wykorzystania i recyklingu. Strategia kładła tu nacisk na rozwiązania ekonomiczne, choć nie wykluczała zastosowania klasycznych przepisów narzucających obowiązek odzysku i powtórnego wykorzystania odpadów;

3. *Optymalizacja unieszkodliwiania odpadów i przestrzeganie rygorystycznych norm w zakresie składowania odpadów*, dotyczących: wyboru lokalizacji, budowy i eksploatacji obiektu, wstępnej obróbki składowanych odpadów, rodzaju przyjmowanych odpadów oraz nadzoru po zamknięciu obiektu. Strategia postulowała zwiększenie zaangażowania na rzecz szerszego zastosowania obróbki fizykochemicznej lub biologicznej odpadów, tzn. neutralizowania, stabilizowania, kompostowania czy fermentacji zamiast ich składowania;

4. *Transport odpadów* zgodny z wymaganiami konwencji bazylejskiej³;

5. *Działania naprawcze*, zwłaszcza w stosunku do wykrywania i rekultywacji „porzuconych składowisk” oraz konieczności stosowania zasady „zanieczyszczający płaci”.

W swojej rezolucji z dnia 24 lutego 1997 r. w sprawie wspólnotowej strategii w zakresie gospodarowania odpadami Rada potwierdziła, że naczelnym priorytetem w gospodarce odpadami powinno być zapobieganie ich powstawaniu oraz że ponowne wykorzystanie i recykling materiałów powinny mieć pierwszeństwo przed odzyskiem energii z odpadów, o ile i tylko w takim zakresie, w jakim są to najbardziej ekologiczne z dostępnych metod. Akcesja Polski do Unii Europejskiej spowodowała konieczność dostosowania naszej regulacji prawnej w zakresie ochrony środowiska, w tym gospodarki odpadami, do aktów prawnych wydanych przez organy UE. Do aktów powszechnie obowiązujących w tym zakresie zaliczyć można następujące:

- dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy, tzw. dyrektywa ramowa,
- dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 1999/31/WE z 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów [3],
- dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 94/62/WE z 20 grudnia 1994 r. w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych [7],
- dyrektywa 2004/12/WE PE I Rady z dnia 11.02.2004 r. zmieniająca dyrektywę 94/62/WE w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych,
- dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2002/96/WE z dnia 27 stycznia 2003 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego [5] (WEEE),
- dyrektywa PE I Rady 2006/66/WE z dnia 6.09.2006 r. w sprawie baterii i akumulatorów oraz zużytych baterii i akumulatorów oraz uchylająca dyrektywę 91/157/EWG [8],
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/76/WE z dnia 4 grudnia 2000 r. w sprawie spalania odpadów [4].

Najistotniejsze znaczenie w zakresie gospodarowania odpadami ma dyrektywa ramowa, która określa ramy prawne gospodarowania odpadami w Unii Europejskiej, nakładając na państwa członkowskie obowiązek podejmowania środków sprzyjających rozwiązaniom, które dają najlepszy dla środowiska wynik całkowity. Polityka dotycząca

³ Tzn. przewóz odpadów przez granicę tylko za zgodą państwa importera na przyjęcie odpadów. Obowiązek reimportowania w przypadku nielegalnego przewozu odpadów przez granicę.

odpadów powinna zmierzać do ograniczenia wykorzystania zasobów oraz sprzyjać praktycznemu zastosowaniu hierarchii postępowania z odpadami, którego celem jest tworzenie środków prawnych promujących ideę „społeczeństwa recyklingu”, dążącego do eliminacji wytwarzania odpadów i do wykorzystywania odpadów jako zasobu. Dyrektywa ramowa formułuje w art. 4 hierarchię zasad dotyczących gospodarowania odpadami:

- **„zapobieganie powstawaniu odpadów.** Przez „zapobieganie” dyrektywa rozumie „środki zastosowane zanim dana substancja, materiał lub produkt staną się odpadami, które zmniejszają:
 - a) ilość odpadów, w tym również przez ponowne użycie produktów lub wydłużenie okresu żywotności produktów;
 - b) niekorzystne oddziaływanie wytworzonych odpadów na środowisko i zdrowie ludzkie; lub
 - c) zawartość substancji szkodliwych w materiałach i produktach”.
- **przygotowanie do ponownego użycia, czyli** „procesy odzysku polegające na sprawdzeniu, czyszczeniu lub naprawie, w ramach których produkty lub składniki produktów, które wcześniej stały się odpadami, są przygotowywane do tego, by mogły być ponownie wykorzystywane bez jakichkolwiek innych czynności przetwarzania wstępnego”. Dyrektywa artykułuje także samo pojęcie „ponowne użycie”, przez które rozumie „jakikolwiek proces, w wyniku którego produkty lub składniki niebędące odpadami są wykorzystywane ponownie do tego samego celu, do którego były przeznaczone”.
- **recykling**, rozumiany jako „jakikolwiek proces odzysku, w ramach którego materiały odpadowe są ponownie przetwarzane w produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w pierwotnym celu lub innych celach. Obejmuje to ponowne przetwarzanie materiału organicznego, ale nie obejmuje odzysku energii i ponownego przetwarzania na materiały, które mają być wykorzystane jako paliwa lub do celów wypełniania wyrobisk”.
- **inne metody odzysku, np. odzysk energii**, czyli „jakikolwiek proces, którego głównym wynikiem jest to, aby odpady służyły użytecznemu zastosowaniu, poprzez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym wypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji, lub w wyniku którego odpady są przygotowywanemu do spełnienia takiej funkcji w danym zakładzie lub w szerszej gospodarce”.
- **unieszkodliwianie** oznacza „jakikolwiek proces niebędący odzyskiem, nawet jeżeli wtórnym skutkiem takiego procesu jest odzysk substancji lub energii”.

Nadrzędnymi celami UE jest prowadzenie gospodarki odpadami w sposób, który gwarantuje wysoki poziom ochrony zdrowia ludzkiego i ochrony środowiska poprzez zapobieganie oraz zmniejszanie negatywnego wpływu wynikającego z wytwarzania odpadów i gospodarowania nimi oraz przez zmniejszenie ogólnych skutków użytkowania zasobów, a także poprawę efektywności takiego użytkowania (art. 1 – dyrektywy ramowej). Zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju – ilość odpadów odprowadzanych wprost do środowiska powinna dążyć do zera, gdyż w pełni powinny być wykorzystane reguły: prewencji, redukcji i ponownego użycia. Dyrektywa określa ramy prawne gospodarowania odpadami w Unii Europejskiej, nakładając na państwa członkowskie obowiązek zapewnienia odzysku i unieszkodliwiania odpadów w sposób nie zagrażający życiu ludzkiemu i nie powodujący szkód w środowisku. Państwa członkowskie na mocy tej dyrektywy zostały zobowiązane do podjęcia działań w celu stworzenia zintegrowanej sieci zakładów zajmujących się unieszkodliwianiem odpadów z wykorzystaniem najnowszych technologii nie pociągających nadmiernych kosztów, zgodnie ze szczególnymi założeniami (takimi jak samowystarczalność w odprowadzaniu odpadów) oraz do ustanowienia systemu reglamentacji i ochrony polegającej na wydawaniu pozwoleń dla podmiotów dokonujących odzysku, magazynowania i składowania odpadów.

2.3. Cele UE w zakresie zagospodarowania poszczególnych kategorii odpadów

Dogodnym punktem wyjścia do przedstawienia celów, jakie UE stawia przed państwami członkowskimi w zakresie kompleksowego zagospodarowania odpadów, będzie dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 1999/31/WE z 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów [3], która wprowadziła restrykcyjne wymagania techniczno-eksploatacyjne wobec składowisk odpadów oraz procedur służących zapobieganiu i obniżaniu negatywnych skutków dla środowiska. Dyrektywa zobligowała państwa członkowskie do ograniczania odpadów komunalnych ulegających biodegradacji, kierowanych do składowania. W przypadku Polski:

- do nie więcej niż 50% wagowo całkowitej masy do dnia 16 lipca 2013 r.,
- do nie więcej niż 35% wagowo całkowitej masy do dnia 16 lipca 2020 r.

w stosunku do masy tych odpadów wytworzonych w 1995 r. Szczególną uwagę należy zwrócić na art. 5, który zobowiązuje państwa członkowskie do opracowania strategii redukcji odpadów biodegradowalnych przeznaczonych do składowania. Z kolei art. 6

dyrektywy zobowiązuje państwa członkowskie do zapewnienia, że na składowisko będą przyjmowane tylko odpady po wcześniejszej obróbce (z wyłączeniem odpadów obojętnych). Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 94/62/WE z 20 grudnia 1994 r. w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych, przyjęła natomiast bardzo ważne cele w zakresie zagospodarowania odpadów opakowaniowych poprzez zapobieganie powstawaniu odpadów opakowaniowych; zmierzanie do wielokrotnego użytku opakowań, recyklingu oraz innych form odzysku odpadów opakowaniowych; zmniejszenia ilości ostatecznie unieszkodliwianych odpadów opakowaniowych; stosowanie w uzasadnionych przypadkach opakowań zwrotnych oraz wprowadzenie wymagań ekologicznych dla opakowań. Uzupełnienia dokonała dyrektywa 2004/12/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 11.02.2004 r. zmieniająca dyrektywę 94/62/WE w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych, która nałożyła na Polskę obowiązek osiągnięcia następujących poziomów odzysku odpadów opakowaniowych do 2014 r.:

- a) co najmniej 60% wagowo odpadów opakowaniowych zostanie poddane odzyskowi;
- b) co najmniej 55% i co najwyżej 80% wagowo odpadów opakowaniowych zostanie poddane recyklingowi;
- c) minimalne wielkości docelowe recyklingu dla materiałów zawartych w odpadach opakowaniowych:
 - 60% wagowo dla szkła,
 - 60% wagowo dla papieru i tektury,
 - 50% wagowo dla metali,
 - 22,5% wagowo dla tworzyw sztucznych, uwzględniając wyłącznie materiał, który jest recyklowany z powrotem w tworzywo sztuczne,
 - 15% wagowo dla drewna.

Kolejne cele zostały wyznaczone w dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2002/96/WE z dnia 27 stycznia 2003 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (WEEE), do których zaliczamy ograniczenie ilości zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego; zwiększenie ponownego użycia, recyklingu oraz innych form odzysku takiego złomu tak, aby ograniczyć ilość unieszkodliwianych odpadów; dążenie do poprawy funkcjonowania w środowisku naturalnym wszystkich podmiotów zaangażowanych w cykl życia sprzętu elektrycznego i elektronicznego, tzn. producentów, dystrybutorów i konsumentów, w szczególności podmiotów bezpośrednio zaangażowanych w przetwarzanie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego; stworzenie systemu umożliwiającego posiadaczom końcowym oraz dystrybutorom zwrócenie takich

odpadów, co najmniej nieodpłatnie oraz osiągnięcie średniego poziomu wskaźnika zbiórki selektywnej zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego pochodzącego z gospodarstw domowych rzędu przynajmniej czterech kilogramów na mieszkańca rocznie.

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2006/66/WE z dnia 6.09.2006 r. w sprawie baterii i akumulatorów oraz zużytych baterii i akumulatorów oraz uchylająca dyrektywę 91/157/EWG zakłada z kolei następujące cele:

- zmaksymalizowanie selektywnego zbierania zużytych baterii i akumulatorów;
- zredukowanie do minimum unieszkodliwiania baterii i akumulatorów w postaci zmieszanych odpadów komunalnych;
- osiągnięcie wysokiego poziomu recyklingu wszystkich zużytych baterii i akumulatorów;
- wspieranie badań i zachęcanie do zwiększenia całkowitej wydajności ekologicznej baterii i akumulatorów w całym ich cyklu życia;
- zachęcanie do opracowywania i wprowadzenia do obrotu baterii i akumulatorów zawierających mniejsze ilości niebezpiecznych substancji lub zawierających mniej substancji zanieczyszczających, w szczególności jako środków zastępczych dla rtęci, kadmu i ołowiu;
- osiągnięcie następujących minimalnych poziomów zbierania:
 - a) 25% do dnia 26 września 2012 r.,
 - b) 45% do dnia 26 września 2016 r.

Oprócz wymienionych wyżej szczegółowych celów kompleksowego zagospodarowania poszczególnych kategorii odpadów, dyrektywa ramowa wskazuje także na środki służące zapobieganiu powstawaniu odpadów, tj. wykorzystanie środków planowania lub innych instrumentów ekonomicznych wspierających efektywne wykorzystanie zasobów oraz wprowadzenie odpowiednich mechanizmów finansowych, wspomagających rozwój procesów odzysku, by uczynić je bardziej konkurencyjnymi. Ponadto dyrektywa podkreśla potrzebę promocji badań i rozwoju w obszarze pozyskiwania czystszych i bardziej oszczędnych produktów i technologii oraz upowszechniania i wykorzystywania wyników takich badań i rozwoju, a także opracowania na wszystkich poziomach skutecznych i przydatnych wskaźników presji na środowisko związanej z wytwarzaniem odpadów, przy czym celem tych wskaźników ma być przyczynienie się do zapobiegania powstawaniu odpadów, od porównywania produktów na poziomie Unii, przez działania podjęte przez władze lokalne, po środki ogólnokrajowe.

Analizując akty prawne z zakresu gospodarki odpadami komunalnymi możemy pokusić się o konstatację, że Unia Europejska pragnie wypracować ujednolicony system postępowania z odpadami, który będzie się opierał na kilku podstawowych zasadach:

- promowania stosowania bezpiecznych dla środowiska produktów z recyklingu, takich jak papier z odzysku (bez wspierania składowania lub spalania odpadów nadających się do recyklingu);
- stworzenia zachęt do stosowania instrumentów ekonomicznych przyczyniających się do maksymalnego zwiększania korzyści dla środowiska poprzez wykorzystywanie odpadu jako zasobu;
- zapewnienia skutecznych, proporcjonalnych i odstraszających sankcji za naruszenie przepisów dyrektywy w związku z nieprawidłowym gospodarowaniem odpadami;
- przejrzystości procesu tworzenia polityki i przepisów prawa dotyczących odpadów, zgodnego z obowiązującymi krajowymi przepisami w zakresie konsultacji i zaangażowania obywateli i zainteresowanych stron;
- stworzenia programów zapobiegawczych, koncentrujących się na kluczowych elementach oddziaływania na środowisko oraz uwzględniających cykl życia produktów i materiałów;
- tworzenia korzystnych warunków do zbierania selektywnego i właściwego przetwarzania bioodpadów na potrzeby produkcji bezpiecznego dla środowiska kompostu i innych materiałów opartych na bioodpadach, w celu zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych pochodzących ze składowania odpadów oraz przetwarzania tych odpadów w sposób, który zapewnia wysoki poziom ochrony środowiska.

3. Polski system gospodarki odpadami

Na gruncie prawa polskiego trwają prace legislacyjne dostosowujące prawo krajowe do wymagań nowej dyrektywy ramowej. W przygotowaniu jest nowa ustawa o odpadach. Należy jednak pamiętać, że ustawa o odpadach jest elementem kompleksowych uregulowań z zakresu całego prawa ochrony środowiska dotyczącego odpadów, do którego zaliczyć trzeba:

- Ustawę z dnia 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska*,
- Ustawę z dnia 11 maja 2001 r. *o opakowaniach i odpadach opakowaniowych* [27],
- Ustawę z dnia 11 maja 2001 r. *o obowiązkach przedsiębiorców w zakresie gospodarowania niektórymi odpadami oraz o opłacie produktowej i opłacie depozytowej* [26],

- a także znowelizowaną ustawę z dnia 13 września 1996 r. o *utrzymaniu czystości i porządku w gminach* [23], w ramach regulacji której dokonano wdrożenia dwóch omówionych wyżej dyrektyw: dyrektywy Rady 1999/31/WE i dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE.

W zakresie gospodarki odpadami oprócz ww. ustaw istotne znaczenie ma także *Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2014* [16], który zakłada „rozdzielenie wzrostu gospodarczego od ilości wytwarzanych odpadów, rozumiane jako dążenie przy wzroście gospodarczym do stałego ograniczenia ilości wytwarzanych odpadów m. in. poprzez wspieranie nowoczesnych metod i technik wydobycia i produkcji, w celu zachęcenia do lepszej efektywności ekologicznej i zrównoważonego wykorzystania surowców, energii, wody i innych zasobów oraz opracowanie i wprowadzenie w życie szerokiego zakresu instrumentów, łącznie z badaniami naukowymi, przepływem technologii, instrumentami opartymi na rynku i gospodarce, opracowanie i wdrożenie wskaźników efektywności zasobów”.

Wspomniany projekt ustawy transponuje omówioną wyżej hierarchię sposobów postępowania z odpadami na grunt prawa polskiego. Przyjmuje się, że priorytetem w gospodarce odpadami jest zapobieganie ich powstawaniu. Odzysk energii z odpadów, rozumiany jako termiczne przekształcanie odpadów w celu odzyskania energii, ustępuje pierwszeństwa ponownemu użyciu i recyklingowi, chyba że nie jest to możliwe z przyczyn technologicznych lub nie jest uzasadnione z przyczyn ekologicznych bądź ekonomicznych. Zgodnie z art. 9 obowiązującej (jeszcze) ustawy o odpadach, powinny być one w pierwszej kolejności poddawane odzyskowi lub unieszkodliwiane w miejscu ich powstawania. Odpady, które nie mogą być poddane odzyskowi lub unieszkodliwiane w miejscu swego powstawania, powinny być, uwzględniając najlepszą dostępną technikę⁴

⁴ Przez najlepszą dostępną technikę rozumie się najbardziej efektywny oraz zaawansowany poziom rozwoju technologii i metod prowadzenia danej działalności, wykorzystywany jako podstawa ustalania granicznych wielkości emisyjnych, mających na celu eliminowanie emisji lub, jeżeli nie jest to praktycznie możliwe, ograniczanie emisji i wpływu na środowisko jako całość, z tym że pojęcie:

- a) „technika” oznacza zarówno stosowaną technologię, jak i sposób, w jaki dana instalacja jest projektowana, wykonywana, eksploatowana oraz likwidowana,
- b) „dostępne techniki” oznacza techniki o takim stopniu rozwoju, który umożliwia ich praktyczne zastosowanie w danej dziedzinie przemysłu, z uwzględnieniem warunków ekonomicznych i technicznych oraz rachunku kosztów inwestycyjnych i korzyści dla środowiska, a które to techniki prowadzący daną działalność może pozyskać,
- c) „najlepsza technika” oznacza najbardziej efektywną technikę w osiągnięciu wysokiego ogólnego poziomu ochrony środowiska jako całości.

lub technologię, o której mowa w art. 143 ustawy *Prawo ochrony środowiska*, przekazywane do najbliższych położonych miejsc, w których mogą być poddane odzyskowi lub unieszkodliwione. Składowanie odpadów jest ostatecznością stosowaną jedynie wtedy, gdy nie da się ich unieszkodliwić w inny sposób. Wyznaczenie miejsca składowania odpadów wymaga decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu. Organ wydający tę decyzję może uzależnić jej wydanie od przedstawienia przez inwestora ekspertyzy, co do możliwości odzysku odpadów bądź innego niż składowanie ich unieszkodliwiania (art. 51.1 ust. o odpadach). Na składowisku odpadów niebezpiecznych nie mogą być składowane odpady inne niż niebezpieczne. Natomiast art. 55 stanowi, iż zakazuje się składowania odpadów:

- występujących w postaci ciekłej, w tym odpadów zawierających wodę w ilości powyżej 95% masy całkowitej, z wyłączeniem szlamów,
- o właściwościach wybuchowych, żrących, utleniających, wysoce łatwopalnych lub łatwopalnych,
- zakaźnych medycznych i zakaźnych weterynaryjnych,
- powstających w wyniku prac naukowo-badawczych, rozwojowych lub działalności dydaktycznej, które nie są zidentyfikowane lub są nowe i których oddziaływanie na środowisko jest nieznanne,
- opon i ich części, z wyłączeniem opon rowerowych i opon o średnicy zewnętrznej większej niż 1400 mm,
- w śródlądowych wodach powierzchniowych i podziemnych,
- w polskich obszarach morskich.

Odpady powinny być składowane w sposób selektywny dla uniknięcia szkodliwych dla środowiska reakcji pomiędzy składnikami tych odpadów, wykorzystywać możliwość dalszego ich wykorzystania oraz rekultywacji i ponownego zagospodarowania terenu składowiska odpadów. Dopuszcza się składowanie określonych rodzajów odpadów w sposób nieselektywny (mieszanie), jeżeli w wyniku takiego składowania nie nastąpi zwiększenie negatywnego oddziaływania tych odpadów na środowisko (art. 55.4).

4. Energia z odpadów jako odnawialne źródło energii

Dyrektywa ramowa nakłada obowiązek działań mających na celu odzysk odpadów i ich wykorzystanie jako źródła energii. Europejska Agencja Ochrony Środowiska opublikowała w roku 2008 komunikat *Lepsza gospodarka odpadami komunalnymi zmniejsz-*

szy emisje gazów cieplarnianych, w którym wskazała, że w 2005 r. emisje gazów cieplarnianych pochodzących z gospodarki odpadami stanowiły blisko 2% całkowitej emisji w Unii Europejskiej. Tadeusz Pająk podkreśla, że „przeciętny mieszkaniec dużego polskiego miasta wytwarza dziennie 1 kg odpadów komunalnych, których wartość opałowa przekracza 7 MJ/kg, a które w 95% trafiają na składowiska, łatwo wyliczyć jak duży potencjał energii chemicznej zawartej w odpadach jest trwoniony, nawet, jeśli uwzględnić, że w niektórych przypadkach, i to tylko na terenie nielicznych w kraju składowisk odpadów, niewielka część tej energii jest odzyskiwana w postaci gazu składowiskowego. Zdecydowana większość jest bezpowrotnie tracona, powodując przy tym bardzo istotne źródło emisji metanu do powietrza, który powoduje wielokrotnie większe zagrożenie dla efektu cieplarnianego niż emisja CO₂” [17].

Termiczne przekształcanie odpadów może zostać zaliczone do procesu odzysku lub unieszkodliwiania. Ważną kwestią są wytyczne UE, które odnoszą się m. in. do zakresu pozwoleń stanowiąc, iż każde zezwolenie obejmujące spalanie lub współspalanie z odzyskiem energii zawiera warunek, że odzyskiwanie energii ma się odbywać przy wysokim poziomie efektywności energetycznej. W projekcie ustawy z 5 stycznia 2012, według art. 157, ustęp 2, punkt 3, „termiczne przekształcanie w celu odzysku energii stałych odpadów komunalnych, w spalarniach odpadów i we współspalarniach odpadów, których efektywność energetyczna jest co najmniej równa wartościom określonym w załączniku 1 do ustawy (załącznik II dyrektywy ramowej), stanowi proces odzysku R1 – Wykorzystanie głównie jako paliwa lub innego środka wytwarzania energii”. Natomiast termiczne przekształcanie odpadów komunalnych w spalarniach odpadów lub we współspalarniach odpadów, których efektywność jest mniejsza niż wartości określone w załączniku nr 1 do ustawy, stanowi proces unieszkodliwiania D10 – Przekształcanie termiczne na ładzie. W uzasadnieniu do projektu ustawy czytamy, że zmieniono kwalifikację procesu termicznego przekształcania, do kategorii odzysku lub unieszkodliwienia odpadów. „Kwalifikacja ta jest uzależniona od rodzaju spalanych odpadów oraz wykorzystywania energii powstałej w wyniku prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów poza procesem termicznego przekształcania odpadów. W przypadku spalania odpadów komunalnych dyrektywa ramowa uzależnia ww. klasyfikację od efektywności energetycznej spalarni odpadów lub współspalarni odpadów. Zakwalifikowanie tego procesu do odzysku R1 może nastąpić zatem tylko w przypadku, gdy jest on efektywny energetycznie, zgodnie z wymaganiami zawartymi

w załączniku II do dyrektywy, które to wymagania zostały transponowane w załączniku nr 1 do projektowanej ustawy”⁵.

W ramach polityki ekologicznej państwa zwraca się szczególną uwagę na wzrost wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych oraz racjonalne prowadzenie systemu gospodarki odpadami komunalnymi. Możemy powiedzieć, że łączenie tych dwóch priorytetów działania jest szansą na spełnienie unijnych norm uzyskania energii z odpadów. Beata Kłopotek wskazuje na następujące sposoby osiągnięcia tego celu [14]:

- bezpośrednie spalanie w spalarni odpadów (np. zmieszane odpady komunalne, przeterminowane środki ochrony roślin i inne odpady niebezpieczne),
- wytwarzanie tzw. paliwa alternatywnego (wydzielanie odpadów palnych głównie z odpadów z sektora gospodarczego), spalanego w obiektach przemysłowych (np. w cementowniach, elektrowniach, elektrociepłowniach),
- fermentacja odpadów i spalanie wytwarzanego metanu (m. in. odpady gastronomiczne, odpady z przemysłu rolno-spożywczego, odpady z rolnictwa), w tym w biogazowniach rolniczych.

⁵ Pozycja ta obejmuje obiekty przekształcania termicznego przeznaczone wyłącznie do przetwarzania komunalnych odpadów stałych, pod warunkiem, że ich efektywność energetyczna jest równa lub większa niż:

– 0,60 dla działających instalacji, które otrzymały zezwolenie zgodnie ze stosowanymi przepisami wspólnotowymi obowiązującymi przed dniem 1 stycznia 2009 r.;

– 0,65 dla instalacji, które otrzymały zezwolenie po dniu 31 grudnia 2008 r., przy zastosowaniu następującego wzoru: Efektywność energetyczna = $(E_p - (E_f + E_i)) / (0,97 \times (E_w + E_f))$

gdzie:

E_p – oznacza ilość energii produkowanej rocznie jako energia cieplna lub elektryczna. Oblicza się ją przez pomnożenie ilości energii elektrycznej przez 2,6, a energii cieplnej wyprodukowanej w celach komercyjnych przez 1,1 (GJ/rok),

E_f – oznacza ilość energii wprowadzanej rocznie do systemu, pochodzącej ze spalania paliw biorących udział w wytwarzaniu pary (GJ/rok),

E_w – oznacza roczną ilość energii zawartej w przetwarzanych odpadach, obliczanej przy zastosowaniu dolnej wartości opałowej odpadów (GJ/rok),

E_i – oznacza roczną ilość energii wprowadzanej z zewnątrz z wyłączeniem E_w i E_f (GJ/rok); 0,97 jest współczynnikiem uwzględniającym straty energii przez popiół denny i promieniowanie.

Wzór ten stosowany jest zgodnie z dokumentem referencyjnym dotyczącym najlepszych dostępnych technik dla termicznego przekształcania odpadów.

Autorka analizuje strumień odpadów komunalnych pod kątem ponownego wykorzystania, zakładając, że odpady ulegające biodegradacji stanowią ok. 44–55% odpadów komunalnych; odpady palne inne niż ulegające biodegradacji (np. tworzywa sztuczne) stanowią ok. 15% odpadów komunalnych, co oznacza że przy ilości odpadów komunalnych na poziomie 10–12 mln Mg, minimum 25% masy odpadów komunalnych powinno zostać poddane przygotowaniu do ponownego użycia lub recyklingowi, natomiast kolejne 25% mogłoby być wykorzystane do pozyskania energii.

Pojawia się jednak pytanie, czy energię wyprodukowaną w taki sposób możemy zaliczyć do odnawialnych źródeł energii? Odpowiedź możemy znaleźć w art. 158 projektowanej ustawy o odpadach, który stanowi, że „część energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów zawierających frakcje biodegradowalne może stanowić energię z odnawialnego źródła energii, jeżeli są spełnione warunki techniczne zakwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów jako energii z odnawialnego źródła energii, o których mowa w rozporządzeniu ministra środowiska [21] z dnia 2 czerwca 2010 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów komunalnych”. Rozporządzenie to określa m. in. rodzaje frakcji uznanych za biodegradowalne, tj. frakcję podsitową o granulacji 0–20 mm, odpady kuchenne pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, ogrodowe oraz z terenów zieleni, drewno, papier lub tekturę, tekstylia z włókien naturalnych, odpady wielomateriałowe, w tym odpady związane z utrzymaniem higieny oraz skórę. Aby część energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów komunalnych zawierających ww. frakcje mogła być zakwalifikowana jako energia z odnawialnego źródła energii, zgodnie z art. 4, muszą być spełnione, łącznie, następujące warunki techniczne:

- spalane są zmieszane odpady komunalne zawierające co najmniej jedną z frakcji biodegradowalnych, które pochodzą wyłącznie z obszarów, gdzie są selektywnie zbierane odpady przeznaczone do innych procesów odzysku, w tym do procesów recyklingu,
- frakcja podsitowa stanowi część zmieszanych odpadów komunalnych, które ulegają rozkładowi tlenowemu lub beztlenowemu przy udziale mikroorganizmów,
- wartość ryczałtowa udziału energii chemicznej frakcji biodegradowalnych w energii chemicznej całej masy zmieszanych odpadów komunalnych kierowanych do termicznego przekształcania osiąga poziom 42% całości energii odzyskanej w wyniku termicznego przekształcania tych odpadów, wartość ta jest wartością kwalifikującą część energii odzyskanej z termicznego przekształcania zmieszanych odpadów komunalnych jako energii odzyskanej z odnawialnego źródła energii,

- prowadzone są badania udziału energii chemicznej frakcji biodegradowalnych w energii chemicznej całej masy zmieszanych odpadów komunalnych kierowanych do termicznego przekształcenia, na podstawie metodyki badań potwierdzających rzeczywisty udział energii chemicznej frakcji biodegradowalnych w całkowitej energii z termicznego przekształcania zmieszanych odpadów komunalnych, określonej w załączniku do rozporządzenia, zwane dalej „badaniami”,
- badania są wykonywane przez laboratoria akredytowane lub mające certyfikat wdrożonego systemu jakości badań bądź uprawnienia do badania właściwości fizykochemicznych, toksyczności i ekotoksyczności substancji i preparatów, nadane w trybie określonym w przepisach o substancjach i preparatach chemicznych. (Badania przeprowadza się raz na 3 lata, w tym w pierwszym roku, w którym miałyby nastąpić zakwalifikowanie części energii odzyskanej z termicznego przekształcania zmieszanych odpadów komunalnych jako energii z odnawialnego źródła energii),
- termiczne przekształcenie zmieszanych odpadów komunalnych zawierających frakcje biodegradowalne odbywa się zgodnie z warunkami określonymi w przepisach dotyczących termicznego przekształcania odpadów, w szczególności w zakresie emisji zanieczyszczeń do powietrza,
- prowadzona jest wiarygodna dokumentacja dotycząca ilości i jakości odpadów dostarczonych do procesu termicznego przekształcania odpadów w postaci ewidencji odpadów oraz wyników badań.

Rozporządzenie zawiera także załącznik określający metodykę przeprowadzanych badań pozwalającą na ustalenie udziału w odpadach frakcji biodegradowalnych.

W projekcie ustawy o odpadach zaproponowano także zmiany do wspomnianego rozporządzenia ministra środowiska, gdyż art. 44, ust. 8 ustawy o odpadach w obowiązującym brzmieniu ogranicza zakres ww. rozporządzenia wyłącznie do spalania odpadów komunalnych w spalarniach odpadów. Zaproponowana zmiana ma na celu umożliwienie rozszerzenia zakresu ww. rozporządzenia również o odpady inne niż odpady komunalne, które zawierają frakcje biodegradowalne. Należy podkreślić, że energia pochodząca ze spalania odpadów stanowiących biomasę, w rozumieniu przepisów wydanych na podstawie art. 9a, ust. 9 ustawy z dnia 10 kwietnia 1997 r. – *Prawo energetyczne* [24] może w całości zostać uznana za energię z odnawialnego źródła energii, dzieje się to na podstawie przepisów rozporządzenia ministra gospodarki [20] z dnia 14 sierpnia 2008 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii.

Podsumowanie

Racjonalne prowadzenie systemu gospodarki odpadami, zgodnie z omówioną hierarchią, umożliwi ograniczenie składowania odpadów, w szczególności odpadów ulegających biodegradacji, oraz ograniczenie zmian klimatu powodowanych przez gospodarkę odpadami. Istnieje także możliwość zwiększenia udziału w bilansie energetycznym kraju energii ze źródeł odnawialnych poprzez zastępowanie energii ze spalania paliw kopalnych energią z termicznego przekształcania odpadów. W zachodnich krajach Unii Europejskiej i w Skandynawii od lat stosuje się efektywne technologie odzysku energii z odpadów komunalnych, „co pozwala z dwóch ton odpadów komunalnych uzyskać energię przewyższającą energetycznie równowartość 1 tony węgla. Na przykład w Szwecji na cele produkcji energii cieplnej i elektrycznej spala się ok. 50% odpadów komunalnych, które sortowane są »u źródła«, czyli w gospodarstwach domowych. Większość pozostałych odpadów (45%) poddawana jest recyklingowi, głównie metal, szkło, plastik, papier i frakcja biologiczna” [22].

Dostosowując się do wytycznych dyrektywy i aby przybliżyć się do celu, jakim jest europejskie społeczeństwo recyklingu o wysokiej wydajności zasobów, należy przyjąć wszelkie niezbędne środki służące (art. 11, ustęp 2 dyrektywy ramowej):

- zwiększeniu wagowo do minimum 50% do roku 2020 przygotowania do ponownego użycia i recyklingu materiałów odpadowych, przynajmniej takich, jak papier, metal, plastik i szkło z gospodarstw domowych (w miarę możliwości także innego pochodzenia, pod warunkiem, że te strumienie odpadów są podobne do odpadów z gospodarstw domowych),
- zwiększeniu wagowo do minimum 70% do 2020 r. przygotowania do ponownego użycia, recyklingu i innych sposobów odzyskiwania materiałów, w tym wypełniania wyrobisk, gdzie odpady zastępują inne materiały, w odniesieniu do innych niż niebezpieczne odpadów budowlanych i rozbiórkowych.

Unia Europejska nakłada na Polskę obowiązek zmniejszenia ilości odpadów biodegradowalnych gromadzonych na składowiskach, które powinno być osiągane poprzez stosowanie metod recyklingu, kompostowania, produkcji biogazu oraz wprowadzania innych działań, które zmierzają do odzysku materiałów i energii. Niewykorzystywanie odpadów pochodzenia roślinnego i zwierzęcego jako źródła energii odnawialnej, szczególnie przy zastępowaniu paliw kopalnych, spowalnia proces osiągnięcia limitów wykorzystania energii odnawialnej przez Polskę.

Istniejące kompleksy gospodarki odpadami w gminach nie są wystarczające. Szansę daje wybudowanie instalacji do termicznego przekształcania odpadów, choć bardzo kosztowne, jest to w dłuższej perspektywie na pewno korzystniejsze dla środowiska, gdyż pozwala na wykorzystanie energii zawartej w odpadach oraz zmniejsza zapotrzebowanie na składowiska. Taka inwestycja może przybliżyć gminę do osiągnięcia niezależności. Dyrektywa ramowa podkreśla, że aby umożliwić UE, jako całości, osiągnięcie samowystarczalności w zakresie unieszkodliwiania odpadów i odzysku zmieszanych odpadów komunalnych zebranych z gospodarstw domowych i ułatwić państwu członkowskim stopniowe osiąganie tego celu indywidualnie, konieczne jest stworzenie sieci współpracy w zakresie instalacji unieszkodliwiania odpadów i instalacji do odzysku zmieszanych odpadów komunalnych zebranych z gospodarstw domowych, przy uwzględnieniu warunków geograficznych oraz potrzeby stosowania specjalistycznych instalacji dla niektórych rodzajów odpadów. Termiczne przekształcanie odpadów komunalnych jest jedną z możliwości, która daje Polsce szansę na spełnienie unijnych norm.

LITERATURA

- [1] Banasiński C. (red.), *Harmonizacja prawa polskiego w zakresie przepisów dotyczących samorządu terytorialnego*, UKIE, Warszawa 2001.
- [2] Dyrektywa 2004/12/WE PE i Rady z dnia 11.02.2004 r. zmieniająca dyrektywę 94/62/WE w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych.
- [3] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 1999/31/WE z 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów, DzUrz WE L 182 z 16.07.1999, ze zm.
- [4] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/76/WE z dnia 4 grudnia 2000 r. w sprawie spalania odpadów, DzUrz WE L 332 z 28.12.2000 ze zm.
- [5] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2002/96/WE z dnia 27 stycznia 2003 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (WEEE), DzUrz WE L 37 z 13.02.2003, ze zm.
- [6] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy, DzUrz UE L 312 z 22.11.2008, ze zm.
- [7] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 94/62/WE z 20 grudnia 1994 r. w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych, DzUrz WE L 365 z 31.12.1994 ze zm.
- [8] Dyrektywa PE i Rady 2006/66/WE z dnia 6.09.2006 r. w sprawie baterii i akumulatorów oraz zużytych baterii i akumulatorów oraz uchylająca dyrektywę 91/157/EWG, DzUrz WE L 266 z 26.09.2006, ze zm.
- [9] *Environment 2010*, „Our Future, Our Choice” – 6th EU Environment Action Programme, European Communities, 24.1.2001, Brussels.

- [10] Górski M., *Aktualne regulacje prawne w zakresie ochrony środowiska*, Poznań 2009.
- [11] Górski M., *Gospodarowanie odpadami w świetle wymagań prawa wspólnotowego i polskiego prawa wewnętrznego*, Poznań 2005.
- [12] Górski M. (red.), *Prawo ochrony środowiska*, Warszawa 2009.
- [13] Jerzmański J. (red.), *Ustawa o odpadach. Komentarz*, Centrum Prawa Ekologicznego, Wrocław 2002.
- [14] Kłopotek B. B., *Odpady a zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego państwa*, „Odpady i Środowisko” 2010, nr 4 (64).
- [15] Korzeniowski P., *Zasady ogólne prawa ochrony środowiska*, [w:] M. Górski (red.), *Prawo ochrony środowiska*, Warszawa 2009.
- [16] *Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2014, uchwalony przez Radę Ministrów dnia 24 grudnia 2010 r.* Uchwała nr 217 z 2010, MP, 2010, nr 101, poz. 1183.
- [17] Pająk T., *Zakład termicznego przekształcania odpadów komunalnych, jako źródło użytecznej i zielonej energii dla wytwórców odpadów*, Kraków 2009.
- [18] Projekt ustawy o odpadach z 05.01.2012 r. dostępny na <http://www.mos.gov.pl>.
- [19] Rakoczy B., Wierzbowski B., *Podstawy prawa ochrony środowiska*, Warszawa 2004.
- [20] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii, DzU z 2008, nr 156, poz. 969, ze zm.
- [21] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 2 czerwca 2010 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów komunalnych, DzU z 2010, nr 117, poz. 788.
- [22] Serzysko A., *Gospodarowanie odpadami w Szwecji – wnioski dla Polski*, „Odpady i Środowisko” 2010, nr 2 (62).
- [23] Ustawa z dnia 13 września 1996 r. o utrzymaniu czystości i porządku w gminach. Tekst jednolity DzU z 2005, nr 236, poz. 2008, ze zm. (ostatnia znacząca nowelizacja z 2011 r., nr 152, poz. 897).
- [24] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – *Prawo energetyczne*, DzU z 2006, nr 89, poz. 625, ze zm.
- [25] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska*. Tekst jednolity: z dnia 23 stycznia 2008 r., DzU z 2001, nr 25, poz. 150.
- [26] Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. o obowiązkach przedsiębiorców w zakresie gospodarowania niektórymi odpadami oraz o opłacie produktowej i opłacie depozytowej. Tekst jednolity DzU z 2007, nr 90, poz. 607, ze zm.
- [27] Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. o opakowaniach i odpadach opakowaniowych, DzU z 2001, nr 63, poz. 638, ze zm.
- [28] Ustawa z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie, DzU z 2007, nr 75, poz. 493, ze zm.

Część II

Uwarunkowania techniczne gospodarki odpadami

Wstęp

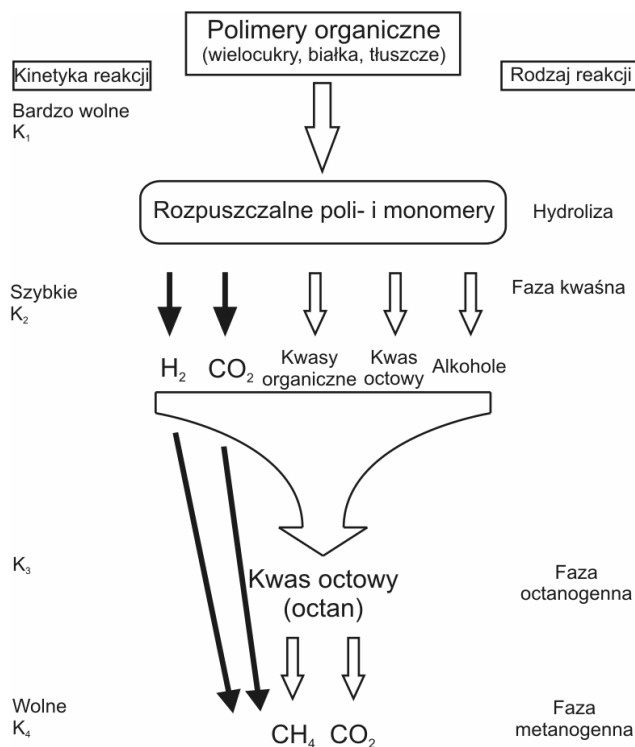
Wraz z rozwojem cywilizacji wzrasta ilość produkowanych odpadów. Najstarszą metodą ich unieszkodliwiania jest deponowanie na składowiskach. Zdeponowane odpady komunalne podlegają długotrwałym przemianom o złożonym charakterze, wśród których można wyróżnić procesy fizyczne, chemiczne oraz biologiczne. Składowisko odpadów komunalnych jest traktowane jako olbrzymi bioreaktor heterogeniczny, w którym występują trzy stany skupienia: stały – odpady, ciekły – odcieki oraz gazowy – biogaz.

Deponowanie odpadów na składowiskach jest główną metodą unieszkodliwiania odpadów komunalnych w Polsce. Końcowym produktem rozkładu materii organicznej zawartej w odpadach jest biogaz, w skład którego wchodzi dwutlenek węgla oraz metan. Według polskiego ustawodawstwa gaz składowiskowy jest zaliczany do źródeł energii odnawialnej. Ze względu na wysoką wartość opałową metanu, powstający biogaz może być przez pewien czas wykorzystywany do produkcji energii. Po tym okresie następuje powolna emisja biogazu o małej zawartości metanu, która może trwać nawet przez kilkadziesiąt lat, stanowiąc zagrożenie dla środowiska. Przyspieszenie procesów produkcji biogazu z odpadów można uzyskać poprzez recyrkulację odcieków. Stosowanie jej jest szczególnie wskazane podczas wykorzystywania biogazu do produkcji energii. Gdy produkowanego biogazu nie będzie można wykorzystać do wytwarzania energii ze względów ekonomicznych, powolną emisję metanu do środowiska można ograniczyć przez zastosowanie biofiltra lub aerobowej stabilizacji odpadów.

W pracy przedstawiono opis procesów zachodzących w odpadach, jak również opis metod zagospodarowania biogazu i przyspieszenia wspomnianych procesów. Zawiera ona ponadto opis składowisk odpadów komunalnych w województwie łódzkim i sugestie rozwiązań dla poszczególnych obiektów tego typu.

1. Opis procesów zachodzących w odpadach

Składowiska odpadów komunalnych stanowią duże zagrożenie dla środowiska poprzez emisję zanieczyszczeń. Największe zagrożenie związane jest z materią organiczną zawartą w odpadach komunalnych. Według Krajowego Planu Gospodarki Odpadami 2010 [21] aż 47% odpadów komunalnych stanowią odpady ulegające biodegradacji. Do odpadów takich należą papier i tektura, tekstylia, odpady zielone oraz odpady kuchenne. Odpady ulegające biodegradacji można podzielić na odpady łatwo (odpady kuchenne), średnio (odpady zielone) oraz trudno biodegradowalne (tekstylia, papier i tektura). Połowiczny czas rozkładu odpadów łatwo biodegradowalnych wynosi 1 rok, średnio degradowanych 5 lat, trudno biodegradowalnych zaś 15 lat [14].



Rys. 1. Rozkład związków organicznych w warunkach anaerobowych [39]

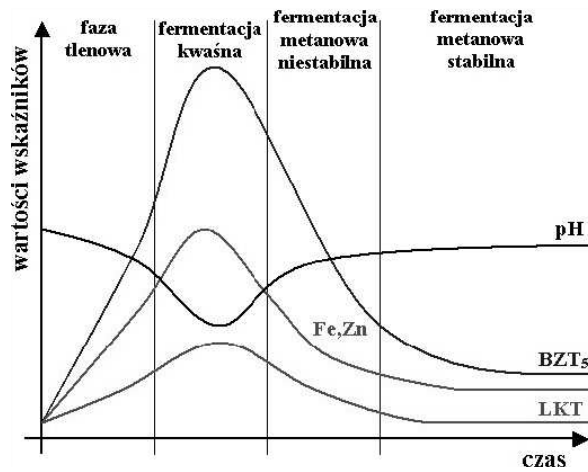
We wszystkich składowiskach odpadów komunalnych w Polsce rozkład materii organicznej zawartej w odpadach przebiega w warunkach anaerobowych (fermentacja metanowa). W roku 2008 wytworzono w Polsce 12,2 Tg odpadów komunalnych, przy czym główną metodą ich unieszkodliwiania było deponowanie na składowiskach (96,4%). Liczba czynnych składowisk odpadów komunalnych w Polsce w roku 2008 sięgała 879 [10]. Na rys. 1 przedstawiono etapy rozkładu związków organicznych (odpadów ulegających biodegradacji) zawartych w odpadach komunalnych. Rozkład materii organicznej w warunkach anaerobowych przebiega w czterech etapach: hydrolizy, kwasogenezy, octanogenezy oraz metanogenezy.

W fazie hydrolizy następuje rozkład spolimeryzowanych, w większości nierozpuszczalnych związków organicznych przez enzymy odpowiednich szczepów bakterii hydrolizujących w rozpuszczalne monomery i dimery. Rozkład tych wielocząsteczkowych związków odbywa się poprzez enzymy wydzielone pozakomórkowo przez komórki lub w bezpośrednim kontakcie z substratem [22].

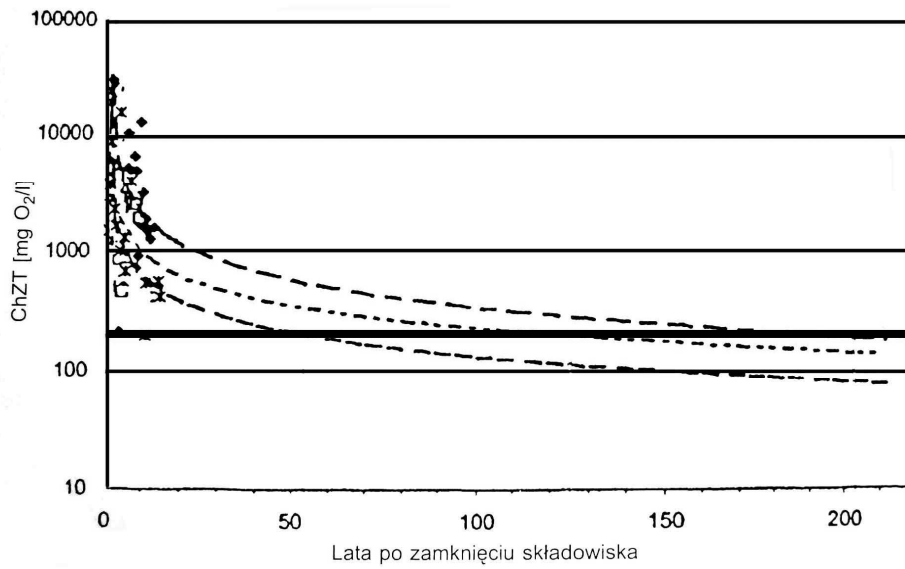
W etapie II, zwanym kwasogenezą, fakultatywne bakterie rozkładają rozpuszczone w wodzie związki do krótkołańcuchowych kwasów tłuszczowych, alkoholi, aldehydów, dwutlenku węgla oraz wodoru. Lotne kwasy tłuszczowe (LKT) oraz alkohole stanowią około 76% związków powstałych z produktów po hydrolizie, wodór i dwutlenek węgla 4% a octany 20% [27]. Trzecim etapem jest octanogeneza, odpowiednie grupy bakterii rozkładają w nim wyższe kwasy organiczne do kwasu octowego, dwutlenku węgla i wodoru. Etap IV rozkładu materii organicznej w warunkach anaerobowych jest nazywany metanogenezą. W fazie tej bakterie metanogenne wytwarzają metan z kwasu octowego, H₂, CO₂, mrówczanu, metanolu, metyloaminy i siarczku dimetylowego [16]. W fazie metanogenezy 70% metanu powstaje na skutek redukcji octanów [19].

Etapy I i II nazywane są fermentacją kwaśną, a etapy III oraz IV – fermentacją metanową. Na przebieg procesu fermentacji metanowej mają wpływ odczyn pH, substancje poddawane procesowi fermentacji metanowej, związki toksyczne oraz temperatura.

Pośrednim produktem rozkładu materii organicznej do dwutlenku węgla oraz metanu są odcieki. Skład odcieków jest zmienny w czasie i zależy od procesów, jakie zachodzą w odpadach. Zmiany składu odcieków podczas rozkładu materii organicznej w odpadach komunalnych przedstawiono na rys. 2. W pierwszej fazie tlenowej można zaobserwować wzrost stężenia LKT, BZT₅ (biochemiczne zapotrzebowanie na tlen) oraz stężenia Fe i Zn w odciekach, co jest związane z etapem hydrolizy związków organicznych zawartych w odpadach. Największe wartości LKT, BZT₅ oraz stężenia Fe, Zn w odciekach występuje w drugiej fazie, zwanej kwaśną. W fazie tej wartość pH osiąga najmniejsze wartości, a LKT i BZT₅ największe, co jest związane z intensywną produkcją kwasów tłuszczowych.



Rys. 2. Zmiany składu odcieków z anaerobowego składowiska odpadów komunalnych [28]

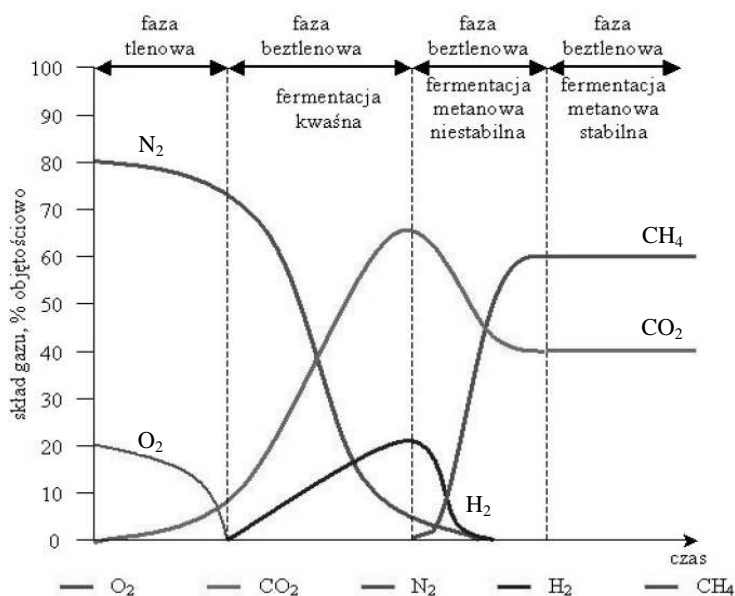


Rys. 3. Zmiany wartości ChZT w czasie z trzech składowisk odpadów [39]

W kolejnej fazie fermentacji metanowej niestabilnej można zaobserwować zmniejszanie się wartości LKT, BZT₅ oraz stężenia Fe, Zn w odciekach. W fazie tej obniżenie wskaźnika BZT₅ i LKT zachodzi w wyniku zużywania octanów przez bakterie metanogenne. W czwartej fazie fermentacji metanowej stabilnej można zaobserwować stabilizację zmian tych wskaźników odcieków.

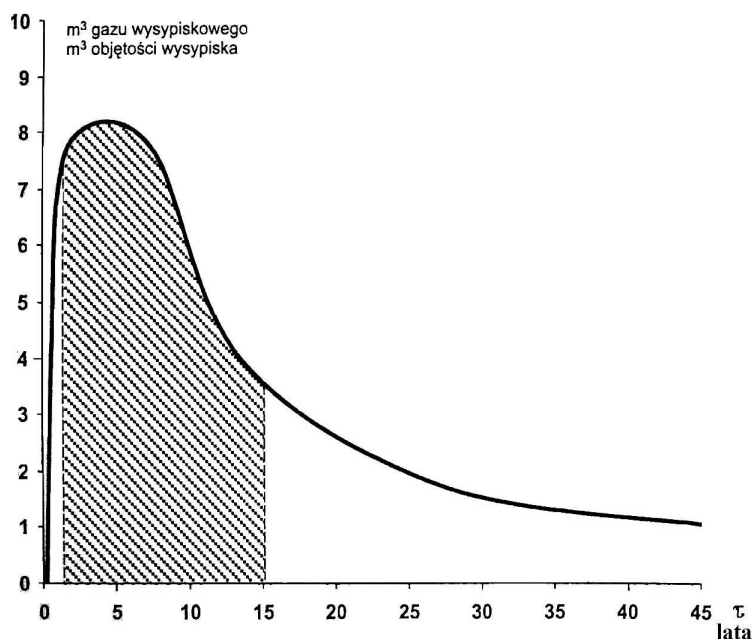
Na rys. 3 przedstawiono zmiany wskaźnika ChZT (chemiczne zapotrzebowanie na tlen) w czasie. Punktami zaznaczono zmiany wskaźnika ChZT z trzech składowisk odpadów komunalnych. Liniami przerywanymi oznaczono prognozowane zmiany wskaźnika ChZT, pogrubioną linią zaś dopuszczalną wartość wskaźnika ChZT w odciekach, jaka może być wprowadzana do ziemi. Dla niektórych składowisk wartość wskaźnika ChZT może osiągnąć poziom akceptowany po 50 latach od zamknięcia składowiska, a w niektórych przypadkach dopiero po 200 latach.

Końcowymi produktami rozkładu materii organicznej zawartej w odpadach są metan i dwutlenek węgla. Skład biogazu powstającego na składowisku odpadów komunalnych jest zależny od procesów zachodzących w odpadach. Zmiany składu gazu ze składowiska omawianego typu przedstawiono na rys. 4. Pierwsza faza (tlenowa) trwa tylko



Rys. 4. Skład gazu ze składowiska odpadów z upływem czasu [32]

przez 2 tygodnie, co jest spowodowane szybkim zużyciem tlenu zawartego w przestrzeniach pomiędzy odpadami. W fazie tej stężenie tlenu spada do zera oraz wzrasta stężenie dwutlenku węgla. Następnie w odpadach rozpoczyna się faza beztlenowa, w której można wyróżnić fazy kwaśną, metanową niestabilną oraz metanową stabilną. Faza kwaśna trwa około 2 miesięcy. Rozpoczyna się w niej produkcja wodoru, następuje dalszy wzrost stężenia dwutlenku węgla oraz zmniejszanie stężenia azotu w gazie wylotowym ze składowiska. W fazie metanowej niestabilnej można zaobserwować zanik stężenia wodoru oraz azotu w biogazie, a pojawia się produkcja metanu. W fazie tej następuje również zmniejszenie stężenia dwutlenku węgla. W kolejnej fazie, zwanej metanową stabilną, stężenie CH_4 i CO_2 w biogazie utrzymuje się na stałym poziomie (45% – CO_2 i 55% – CH_4). W powstającym biogazie ze składowiska oprócz metanu i dwutlenku węgla występują liczne związki śladowe, do których można zaliczyć: benzen, toluen, siarkowodór, amoniak, aceton, etan, aldehyd octowy oraz związki chloroorganiczne [32].



Oprócz zmian składu biogazu produkowanego z odpadów zmienia się również jego ilość. Na rys. 5 przedstawiono zmiany szybkości produkcji biogazu w zależności od czasu dla wybranego składowiska. Powierzchnią zakreskowaną oznaczono obszar, w którym powstający biogaz można teoretycznie wykorzystać do produkcji energii. Po okresie 45 lat da się nadal zaobserwować powolną produkcję biogazu ze składowiska, co jest spowodowane wolnym rozkładem trudno biodegradowalnych odpadów, takich jak papier i tekstylia.

2. Efekt cieplarniany oraz właściwości metanu

Wskaźnik GWP (Global Warming Potential), określający wpływ poszczególnych związków na efekt cieplarniany, dla dwutlenku węgla jest równy 1, a dla metanu wynosi 21. Wyższa wartość wskaźnika GWP dla metanu spowodowana jest silniejszą absorpcją promieniowania podczerwonego, a także tym, że produkty rozkładu CH_4 w troposferze, wskutek reakcji z rodnikami hydroksylowymi, dają również gazy cieplarniane.

Roczna emisja metanu ze wszystkich źródeł na świecie szacowana jest na ok. 500–600 Tg, z czego ok. 200 Tg pochodzi ze źródeł naturalnych [8]. Do trzech największych źródeł antropogenicznej emisji metanu zalicza się hodowlę zwierząt (85 Tg), uprawę ryżu (60 Tg) oraz składowiska odpadów (od 40 do 60 Tg) [23].

Do pozytywnych właściwości metanu zalicza się jego wartość opałową (18,3 MJ/m³ przy zawartości metanu w biogazie 50%), dzięki czemu metan może być wykorzystywany do produkcji energii poprzez spalanie. Podczas pracy z metanem należy uważać na jego właściwości wybuchowe. Dolna granica wybuchowości dla metanu wynosi 5%, górna 15% [32].

3. Symulacja składowisk w lizymetrach

W celu optymalizacji procesów oraz lepszego zrozumienia procesów zachodzących w składowiskach wykonuje się symulacje doświadczalne w specjalnie zaprojektowanych bioreaktorach zwanych również lizymetrami. Lizymetry, czy też bioreaktory, zbudowane są z pojemników, które są załadowywane odpadami, a następnie szczelnie zamykane pokrywami. Pokrywy są wyposażone w system przyłączy, dzięki którym możemy odbierać powstający biogaz, jak również recykulować odcieki. W lizymetrach bada się zarówno wpływ parametrów operacyjnych (np. recyrkulacja odcieków), jak i wpływ składu

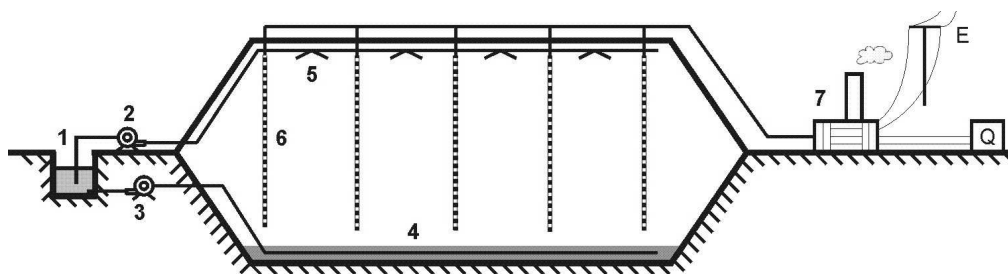
odpadów, wprowadzanych dodatkowo do lizymetrów związków, na procesy zachodzące w odpadach. Lizymetry są również wykorzystywane do symulacji pracy biofiltrów, w których następuje utlenianie metanu do dwutlenku węgla.

Interesujące jest, że w lizymetrach można eksperymentalnie zasymulować pracę składowiska odpadów i uzyskać podobne przebiegi zmian stężenia i składu odcieków oraz biogazu jak na rzeczywistym składowisku [17] [18], a ponadto można przebadąć wpływ recyrkulacji odcieków i napowietrzania odpadów na intensyfikację procesów rozkładu materii organicznej w składowiskach.

4. Metody przyspieszania procesów na składowiskach

4.1. Recyrkulacja odcieków

Rozkład materii organicznej zawartej w odpadach jest prowadzony przez mikroorganizmy, dla których zawartość wody w odpadach jest ważnym czynnikiem środowiskowym. Średnia zawartość wilgoci w odpadach wynosi w przybliżeniu 30%. Według różnych autorów optymalna zawartość wilgoci w odpadach powinna być w zakresie od 50 do 70%. Zbyt duża zawartość wilgoci w odpadach nie jest wskazana, ze względu na dużą pojemność cieplną, co może wywoływać obniżenie temperatury wewnątrz odpadów,



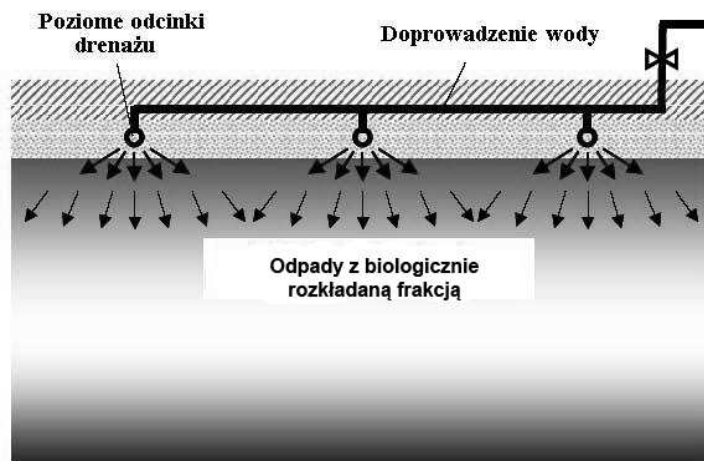
Rys. 6. Składowisko odpadów komunalnych wyposażonych w system recyrkulacji odcieków

1 – zbiornik na odcieki, 2 i 3 – pompy odcieków, 4 – system drenażu umożliwiający odbiór odcieków, 5 – system drenażu umożliwiający rozprowadzanie odcieków, 6 – perforowane rury do odbioru powstającego biogazu, 7 – kogenerator (opracowanie własne)

a tym samym zmniejszyć szybkość produkcji biogazu [32]. Zawartość wilgoci poniżej 30% inhibuje proces produkcji metanu, a poniżej 15% wręcz zatrzymuje proces fermentacji. Zwiększenie zawartości wilgoci w odpadach można uzyskać poprzez system recyrkulacji odcieków. System ten składa się z czterech podstawowych elementów: systemu nawadniania, odbioru powstających odcieków, układu pomp oraz zbiornika. Przykładowe składowisko zawierające układ recyrkulacji odcieków przedstawiono na rys. 6.

System rozprowadzania odcieków w odpadach może być zrealizowany poprzez układ pionowych lub poziomych perforowanych rur umieszczonych w górnej części składowiska. Oprócz wymienionych dwóch układów stosowane jest także rozdeszczowanie odcieków na powierzchni składowiska. Wybór układu do recyrkulacji odcieków jest związany z właściwościami hydraulicznymi odpadów. Układy poziomego i pionowego systemu rozprowadzania odcieków przedstawiono na rys. 7 i 8.

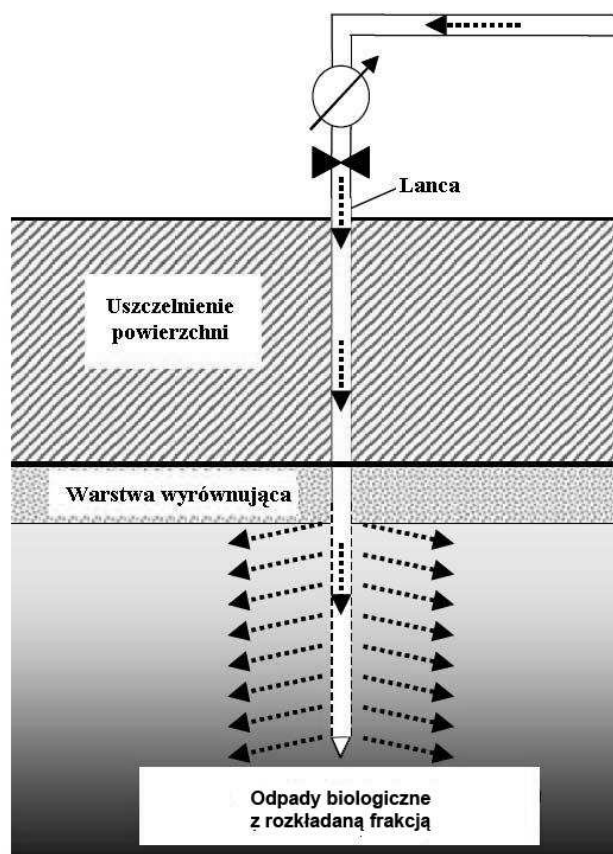
W systemie nawadniania odpadów, oprócz odcieków stosowana jest również woda, odcieki z procesów przemysłowych oraz osad ściekowy z anaerobowej komory fermentacyjnej. System odbioru odcieków powstających w składowisku umieszczony jest na dnie składowiska i zbudowany z poziomych perforowanych rur, umieszczonych w warstwie przepuszczającej fazę ciekłą. System pomp ma zapewnić odsysanie i wtłaczanie określonej ilości odcieków do składowiska.



Rys. 7. Układ poziomego rozprowadzania odcieków [2]

Pohland (1975) jako pierwszy zbadał pozytywny wpływ dodawania wody do odpadów i recyrkulacji odcieków na zwiększenie efektywności produkcji biogazu [30]. Recyrkulacja odcieków jest częstym rozwiązaniem stosowana na całym świecie, również w Polsce. Do głównych zalet stosowania recyrkulacji należy zaliczyć zintensyfikowanie procesów zachodzących w odpadach, a co za tym idzie zwiększenie szybkości produkcji biogazu oraz skrócenie długotrwałego niekorzystnego oddziaływania na środowisko po zamknięciu składowiska. Zwiększenie wilgotności odpadów powoduje również przepływ odcieków przez masę odpadów. Wywołany przepływ odcieków przez odpady powoduje dystrybucję pożywek i enzymów, buforowanie pH, rozcieńczenie składników inhibitujących produkcję metanu oraz równomierne rozprowadzanie mikroorganizmów wewnątrz odpadów [38].

Recyrkulacja odcieków powoduje również zwiększenie odparowywania wody z odcieków oraz zmniejszenie ładunku zanieczyszczeń w odciekach. Gdy składowisko ma kilka kwater, odcieki z kwatery, która jest w fazie eksploatacji, są kierowane na kwaterę zamkniętą. Natomiast odcieki z kwatery zamkniętej są kierowane na kwaterę eksploatawaną w celu rozcieńczenia wysokiego ładunku materii organicznej w odciekach oraz zapoczątkowania wytwarzania biogazu.



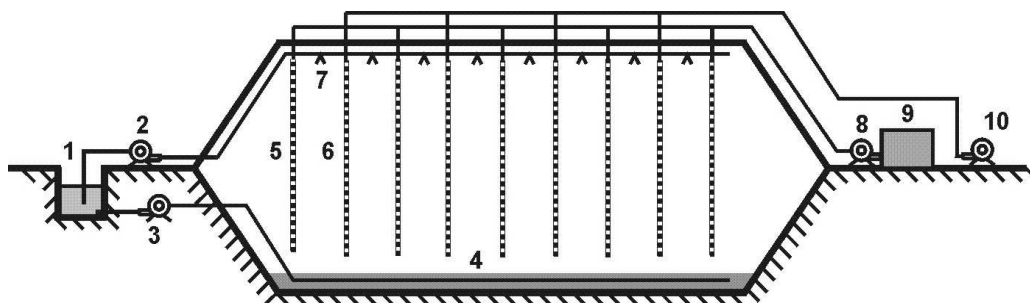
Rys. 8. Układ pionowego rozprowadzania odcieków [2]

Do kolejnych zalet recyrkulacji odcieków należy zaliczyć przyspieszone osiadanie bryły odpadów. Szybszy przebieg tego procesu powoduje, że założona po pewnym czasie warstwa wierzchnia na składowisku jest narażona na mniejsze ryzyko uszkodzenia. Dobre wyniki recyrkulacji odcieków otrzymuje się wtedy, gdy wilgotność odpadów w różnych miejscach składowiska jest taka sama.

Aby można było recyrkulować odcieki, składowisko odpadów komunalnych powinno dysponować systemem uszczelnienia, systemem odbioru odcieków oraz systemem odgazowania. Dodatkowo powinno zawierać tyle nierozłożonej materii organicznej, aby z powstałego biogazu można było produkować energię [34].

4.2. Napowietrzanie odpadów

Bardzo ważną metodą intensyfikującą procesy rozkładowe zachodzące w odpadach jest napowietrzanie. Wprowadzanie powietrza do odpadów powoduje uaktywnienie mikroorganizmów aerobowych, które szybciej rozkładają materię organiczną zawartą w odpadach niż mikroorganizmy anaerobowe. Podczas napowietrzania odpadów ważne jest również utrzymywanie wilgoci na odpowiednim poziomie. Schemat składowiska napowietrzanego przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Składowisko odpadów komunalnych wyposażone w system napowietrzania i recyrkulacji odcieków

1 – zbiornik na odcieki, 2 i 3 – pompy odcieków, 4 – system drenażu umożliwiający odbiór odcieków, 5 – perforowane rury do odbioru powstającego gazu, 6 – perforowane rury do wprowadzania powietrza w odpady, 7 – system drenażu umożliwiający rozproszanie odcieków, 8 – pompa odsysająca na składowisku powstający gaz, 9 – biofiltr, 10 – wentylator wciągający powietrze do odpadów (opracowanie własne)

Optymalna zawartość wilgoci w odpadach podczas ich napowietrzania wynosi od 45 do 65%. Gdy wilgotność odpadów spada poniżej 15% następuje zatrzymanie procesów biologicznych. Wilgotność powyżej 60% prowadzi do powstawania stref beztlenowych ze względu na utrudniony przepływ powietrza oraz utrudnioną dyfuzję tlenu [3]. Aby zachodziły procesy aerobowe stężenie tlenu nie może być niższe od 5% objętości. Optymalne warunki do rozkładu materii organicznej przez mikroorganizmy aerobowe powstają wtedy, gdy stężenie O_2 jest wyższe niż 10% objętości [37].

System napowietrzania może być realizowany przez pionowe lub poziome umieszczenie w składowisku perforowanych rur. Poziomy system napowietrzania jest stosowany na składowiskach, które są w trakcie eksploatacji. Wtłaczanie powietrza do zamkniętego składowiska dokonuje się poprzez pionowy system napowietrzania [9]. Powietrze wprowadzone do odpadów poprzez system perforowanych rur jest rozprowadzane w wyniku konwekcji i dyspersji [13]. Podczas rozpoczynania napowietrzania istnieje możliwość powstania mieszaniny wybuchowej metanu z powietrzem.

Napowietrzanie odpadów powoduje znaczną redukcję ładunku zanieczyszczeń w odciekach, przyspieszenie osiadania bryły odpadów, ograniczenie emisji metanu do atmosfery oraz odparowanie dużych ilości wody związane ze wzrostem temperatury wewnątrz składowiska. Wzrost temperatury wewnątrz masy odpadów wpływa na redukcję drobnoustrojów patogennych. W warunkach aerobowych produkowana jest także mniejsza ilość odorów niż w warunkach anaerobowych.

Cechą charakterystyczną procesów aerobowych, oprócz dużej szybkości rozkładu materii organicznej, jest również wydzielanie znacznych ilości ciepła. Temperatura podczas aerobowego rozkładu materii organicznej jest wyższa niż w warunkach anaerobowych. Optymalna temperatura dla procesów aerobowych wynosi od 50 do 60°C [37]. Gdy temperatura jest mniejsza od 20°C mikroorganizmy namnażają się znacznie wolniej i szybkość procesów rozkładu materii jest bardzo niska. Natomiast gdy temperatura wzrasta powyżej 60°C, następuje inhibicja procesu rozkładu materii organicznej przez mikroorganizmy. Podczas napowietrzania odpadów bardzo ważne jest kontrolowanie temperatury, gdyż nadmierne podgrzanie odpadów może doprowadzić do pożaru.

Napowietrzanie odpadów może być stosowane w składowiskach aerobowych, semi-aerobowych, hybrydowych oraz podczas aerobowej stabilizacji odpadów. Koncepcja aerobowego składowiska odpadów polega na wtłaczaniu do składowiska od chwili zapelnienia kwatery do momentu rozłożenia biodegradowalnej frakcji organicznej zawartej w odpadach. Składowisko jest napowietrzane przez okres od 2 do 4 lat [3]. Podczas na-

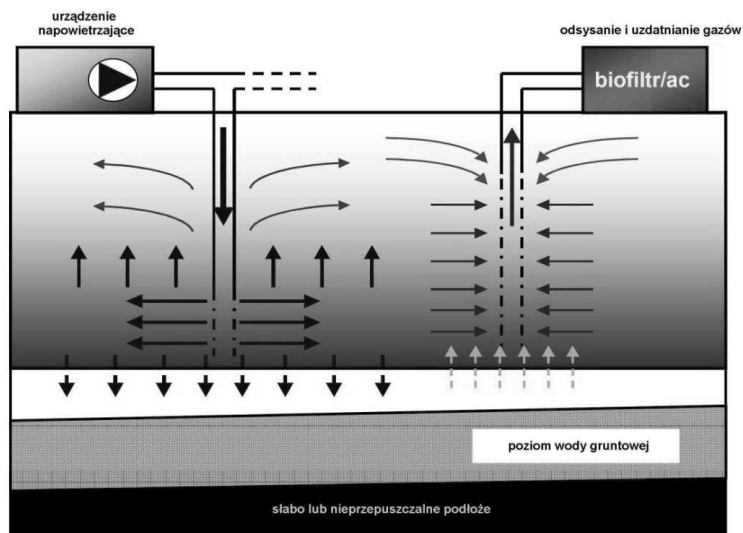
powietrzania składowiska aerobowego zapotrzebowanie na energię jest 12 razy większe niż w składowisku anaerobowym. Oszczędność kosztów na składowisku aerobowym, w porównaniu z anaerobowym, związana jest z krótkim monitoringiem składowiska po jego zamknięciu [36].

Kolejnym rodzajem jest składowisko semi-aerobowe, w którym wtłaczanie powietrza do odpadów odbywa się przez samoczynne zasysanie powietrza ze względu na różnice temperatur w odpadach i powietrzu [11]. Taki sposób napowietrzania może być stosowany do odpadów o małej gęstości, dzięki czemu ułatwiona jest dyfuzja powietrza do odpadów.

Na składowiskach hybrydowych dochodzi do połączenia aerobowych i anaerobowych procesów zachodzących w odpadach. Do składowiska takiego powietrze jest wtłaczane cyklicznie przez krótki okres [26]. W warunkach aerobowych rozkładane są lotne kwasy organiczne, które w początkowej fazie na składowisku anaerobowym inhibują produkcję metanu. Wprowadzenie powietrza do odpadów powoduje również wzrost temperatury wewnątrz składowiska, co przyspiesza procesy anaerobowe. Powietrze wtłaczane jest do górnej części składowiska, natomiast biogaz jest odbierany z dolnych części składowiska. Napowietrzanie, podobnie jak i odbiór biogazu, odbywa się za pomocą poziomego drenażu [12].

W ostatnich latach powstało kilka aplikacji dotyczących aerobowej stabilizacji starych składowisk odpadów. Można tutaj wymienić system Biopuster©, Aeroflott® i Airflow [37]. System napowietrzania Biopuster© charakteryzuje się impulsowym wtłaczaniem powietrza do odpadów pod ciśnieniem 6 bar, za pomocą lanc o długości od 2 do 4 metrów. Aplikacja Biopuster© oprócz stabilizacji starych składowisk jest wykorzystywana do usuwania odorów z odpadów oraz mechaniczno-biologicznej obróbki odpadów przed umieszczeniem ich na składowisku. Po zakończeniu napowietrzania system Biopuster© może być ponownie wykorzystany na innym składowisku. Dodatkowo, dla poprawy wydajności zachodzących procesów, system BioPuster® może zamiast powietrza wprowadzać sam tlen.

W systemach Aeroflott® i Airflow napowietrzanie odpadów odbywa się przy zastosowaniu niskiego nadciśnienia. Powstający w odpadach gaz jest odbierany poprzez studnie odgazowujące, w których panuje podciśnienie. Szybkość odsysania gazu ze składowiska jest przynajmniej o 30% większa niż szybkość napowietrzania, co ma na celu uniknięcie migracji gazu do atmosfery [37]. W układzie odsysania biogazu ze składowiska może zostać zainstalowany biofiltr, dla usunięcia resztkowych zanieczyszczeń. Schemat systemu Airflow® przedstawiono na rys. 10.



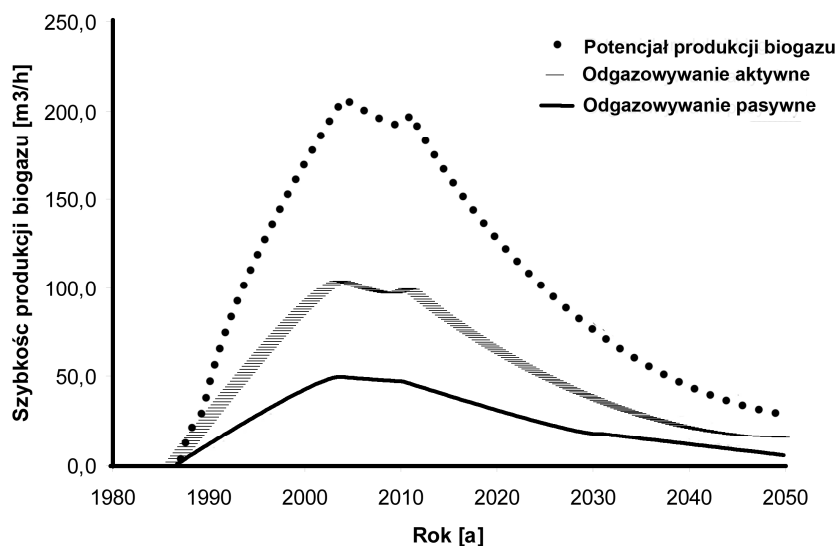
Rys. 10. Pionowy system napowietrzania odpadów [31]

Najbardziej uzasadnione jest zastosowanie aerobowej stabilizacji starych składowisk odpadów komunalnych. Taka stabilizacja redukuje powolną emisję biogazu, która może trwać przez okres kilkudziesięciu lat. Szczególnie uzasadnione jest zastosowanie aerobowej stabilizacji dla składowisk niemających systemu uszczelnienia dna składowiska od ziemi. Brak uszczelnienia powoduje długotrwałą emisję zanieczyszczeń zawartych w odciekach do ziemi i wody.

5. Opis systemu odgazowywania

Składowiska odpadów komunalnych mogą być odgazowywane aktywnie lub pasywnie. Odgazowywanie pasywne polega na wypływie gazu przez studnie odgazowujące w wyniku nadciśnienia panującego w składowisku. Natomiast odgazowanie aktywne polega na wytworzeniu podciśnienia (około 10 kPa) w instalacji odsysającej gaz ze składowiska. Odgazowywanie składowiska jest wykonywane przez perforowane rury umieszczone w bryle składowiska. Systemy odgazowywania można podzielić na pionowe i poziome, ze względu na sposób położenia rur perforowanych w składowisku.

Gdy podczas odgazowania stosuje się aktywny system, można uzyskać 50% potencjalnej szybkości produkcji biogazu, przy pasywnym zaś systemie jedynie 25%. Na rys. 11 przedstawiono potencjalną szybkość produkcji biogazu oraz szybkość odbioru biogazu, przy zastosowaniu aktywnego i pasywnego systemu odgazowywania.



Rys. 11. Zmiany produkcji biogazu ze składowiska odpadów komunalnych w Bartochowie przy zastosowaniu aktywnego i pasywnego systemu odgazowywania

Połączenie studni w systemie aktywnego odgazowywania ze stacją zbiorczą może być dokonane przez kolektor zbiorczy, jak również przez kolektor indywidualny. W tym pierwszym przypadku chodzi o łączenie poszczególnych studni odgazowujących z głównymi przewodami, które doprowadzają biogaz do stacji zbiorczej. Natomiast kolektor indywidualny łączy poszczególne studnie ze stacją zbiorczą [6].

Nim gaz składowiskowy zostanie wykorzystany musi być pozbawiony wilgoci oraz cząstek stałych, jak również zostać sprężony. Dodatkowe operacje zależą od stopnia zanieczyszczenia biogazu. Do głównych zanieczyszczeń biogazu, które przeszkadzają podczas procesu produkcji energii, należą siarkowodór, siloksany, amoniak, węglowodory aromatyczne i halogeny [6].

6. Metody unieszkodliwiania powstającego biogazu

Zmniejszenie efektu cieplarnianego biogazu powstającego na składowisku odpadów komunalnych można uzyskać poprzez spalanie biogazu w pochodni. W wyniku spalania metan zostaje utleniony do dwutlenku węgla, który powoduje 23 razy mniejszy efekt cieplarniany. Spalanie biogazu może być prowadzone z lub bez odzysku energii. W procesie spalania biogazu z odzyskiem energii może być produkowane ciepło, prąd elektryczny lub równocześnie prąd i ciepło.

6.1. Spalanie biogazu z produkcją energii

Do metod bezpośredniego wykorzystania biogazu można zaliczyć:

- wytwarzanie ciepła technologicznego,
- wytwarzanie energii cieplnej – promienniki cieplne,
- odparowanie odcieków [6].

Wytwarzanie ciepła technologicznego zachodzi w wyniku spalania biogazu. Powstała energia może być wykorzystywana do produkcji ciepłej wody, pary wodnej, jak również w procesach technologicznych. Promiennik cieplny służy emisji ciepła w wyniku podgrzania powierzchni do wysokiej temperatury. Podgrzanie powierzchni następuje w efekcie spalania biogazu. Rozgrzana powierzchnia emituje promieniowanie czerwone, które ogrzewa pomieszczenie. Odparowanie odcieków odbywa się poprzez podgrzewanie odcieków ciepłem pochodzącym ze spalania biogazu. Podczas odparowywania wody z odcieków następuje ulatanie związków organicznych, które następnie są spalane w płomieniu, następuje też wykrystalizowanie soli metali ciężkich.

Energia elektryczna może być natomiast produkowana w następujących układach:

- tłokowym silniku spalinowym,
- turbinie gazowej lub mikroturbinie,
- silniku Sterlinga [6].

Zasada działania silnika spalinowego jest oparta na silniku czterosuwowym z zapłonem iskrowym. Silnik napędza turbinę, która produkuje prąd. Układ z tłokowym silnikiem spalinowym dobrze nadaje się do układu kogeneracji, w którym oprócz energii elektrycznej wytwarzane jest ciepło pochodzące z chłodzenia silnika i gazów spalinowych. Podczas produkcji energii elektrycznej w turbinie i mikroturbinie gaz składowiskowy jest wykorzystywany do podgrzewania powietrza, będącego czynnikiem roboczym. Mi-

kroturbiny wyposażone są też w rekuperator. W turbinie i mikroturbinie można więc także produkować ciepło.

Zasada działania silnika Sterlinga jest inna niż silnika spalinowego. W silniku Sterlinga w przestrzeni tłokowej znajduje się powietrze lub gaz obojętny. Ciepło potrzebne do wywołania ruchu tłoka jest dostarczane z zewnętrznego źródła. W źródle tym spalany jest biogaz, w wyniku czego powstaje ciepło do napędzania tłoków. W układzie silnika Sterlinga możliwa jest produkcja ciepła.

Jeszcze więcej detali przedstawionych odnośnie do energetycznego wykorzystania biogazu można znaleźć w książce Dudka i innych [6].

6.2. Spalanie biogazu bez produkcji energii

Spalanie biogazu powstającego na składowisku może odbywać się też w pochodni, w której nie ma odzysku energii. Oprócz redukcji emisji metanu następuje wówczas również zmniejszenie emisji odorów. Podczas spalania biogazu należy zwrócić uwagę na śladowe zanieczyszczenia występujące w biogazie, gdyż niektóre związki w trakcie spalania mogą tworzyć toksyczne zanieczyszczenia.

Pochodnie można podzielić na pasywne i aktywne. W pasywnych następuje spalanie wypływającego ze studni biogazu bez wytwarzania podciśnienia. Pochodnia aktywna jest stosowana, gdy składowisko ma aktywny system odgazowywania. Pochodnia aktywna jest stosowana również w układach z odzyskiem energii, w celu spalania powstającego biogazu w przypadku awarii układu.

W kolejnym podziale pochodni, uwzględniającym ich budowę, można wyróżnić pochodnie otwartą, półzamkniętą oraz zamkniętą. Pochodnie otwarte charakteryzuje brak kontroli procesu spalania (brak kontroli temperatury spalania, mieszania powietrza z biogazem) oraz widoczność płomienia. Pochodnię typu zamkniętego charakteryzuje dokładna kontrola procesu spalania, brak widoczności płomienia, jak również szeroki zakres wydajności spalania biogazu. Pochodnia półzamknięta łączy cechy pochodni zamkniętej i otwartej [24].

6.3. Produkcja biometanu

Z powstającego na składowisku biogazu może być produkowany biometan, którego właściwości będą zbliżone do gazu ziemnego. Produkcja biometanu polega na usunięciu dwutlenku węgla oraz zanieczyszczeń śladowych z biogazu. Stężenie metanu w gazie po procesie usuwania dwutlenku węgla sięga ponad 80% [6].

6.4. Utlenianie metanu w biofiltrze

Rozwiązaniem dla rozproszonej emisji biogazu ze składowiska może być zastosowanie biofiltra, w którym mikroorganizmy metyloτροφiczne utleniają metan do dwutlenku węgla. Biofiltr eliminuje rozproszoną emisję metanu ze składowiska, lecz nie skraca długotrwałych procesów anaerobowych.

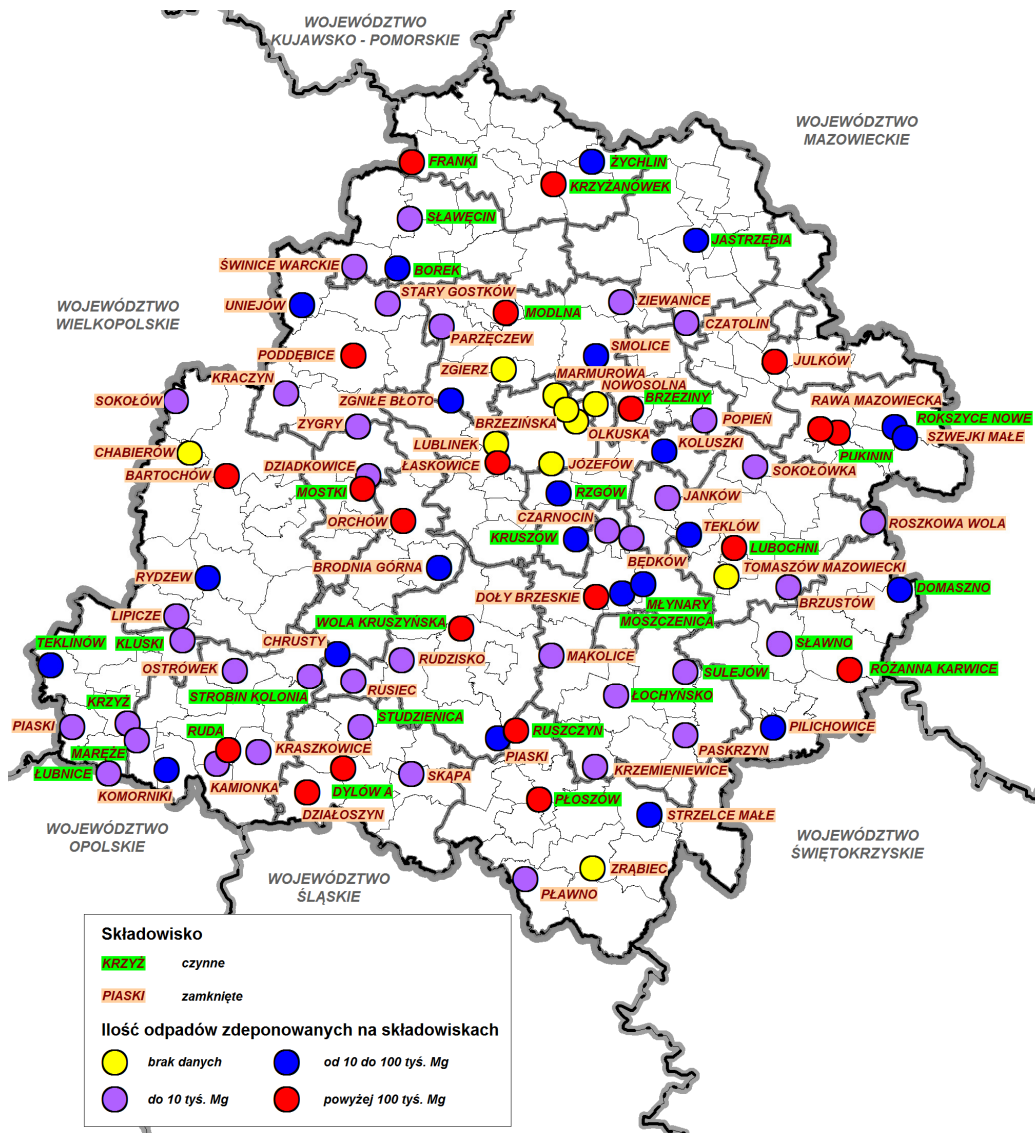
Według danych literaturowych, w standardowej warstwie rekultywacyjnej, w warunkach naturalnych, szybkość biodegradacji metanu wynosi od 0,34 do 5,61 dm³/m²/h [7]. Oprócz warstwy rekultywacyjnej, w której może następować utlenianie metanu, biodegradacja może również zachodzić w biofiltrze. Biofiltr jest to zbiornik zamontowany na studni odgazowującej, o wysokości do 1 metra, w którym znajduje się wypełnienie. Jako wypełnienie biofiltra stosuje się kompost, torf oraz materiały inertne, które zwiększają dyfuzję tlenu z powietrza do wnętrza biofiltra. W literaturze przedmiotu można spotkać dane o różnych szybkościach utleniania metanu w biofiltrze (od 2,5 do 42 dm³/m²/h) w zależności od zastosowanego wypełnienia [29].

Mikroorganizmy utleniające metan występują w dobrze przewietrzanych glebach oraz w wodzie [33]. Zdolności utleniania metanu do dwutlenku węgla mają bakterie metanotroficzne (*Methylomonas*, *Methylococcus*, *Methylosinus*). Brak tlenu w warstwie utleniającej metan prowadzi do inhibicji utleniania metanu. Oprócz utleniania metanu w biofiltrze utleniane są również śladowe związki organiczne zawarte w biogazie ze składowiska [1].

7. Opis składowisk komunalnych w województwie łódzkim

Dane przedstawione poniżej ukazują stan łódzkich składowisk odpadów komunalnych na koniec roku 2010. Prezentowane informacje pochodzą z Urzędu Marszałkowskiego w Łodzi, Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Łodzi, Biura Planowania Przestrzennego Województwa Łódzkiego w Łodzi oraz rozmów z właścicielami składowisk.

Według zebranych danych, w województwie łódzkim znajdują się 92 składowiska odpadów komunalnych, z czego 59 to składowiska zamknięte, a 33 to składowiska eksploatowane (stan na rok 2010). Rozmieszczenie składowisk oraz ich wielkość przedstawiono na rys. 12. Według ilości zdeponowanych odpadów, składowiska podzielono na cztery grupy. Do grupy pierwszej (I) należą składowiska odpadów komunalnych, dla

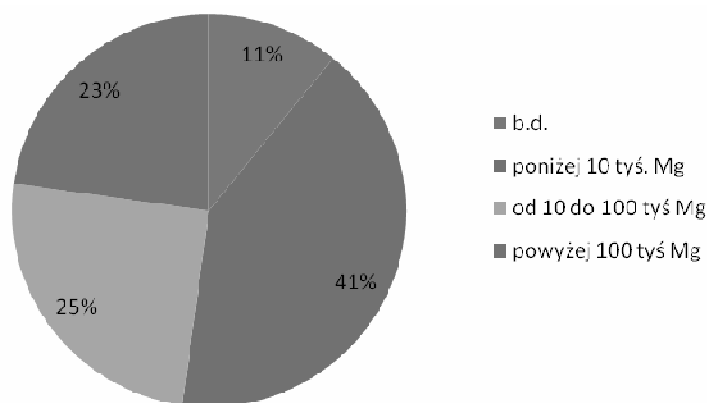


Rys. 12. Spis składowisk odpadów komunalnych w województwie łódzkim (mapę opracowano w Biurze Planowania Przestrzennego Województwa Łódzkiego w Łodzi)

których brak jest danych o ilości zdeponowanych odpadów. Grupę II stanowią składowiska, na których zgromadzono mniej niż 10 tysięcy Mg odpadów. Trzecią grupę (III) stanowią składowiska, zawierające od 10 do 100 tysięcy Mg odpadów komunalnych. Do ostatniej, IV grupy należą składowiska, gdzie zdeponowano więcej niż 100 tysięcy Mg odpadów. Ilość odpadów deponowanych na składowiskach może być różna od podanej w zestawieniu ze względu na fakt, że wiele składowisk nie określało masy odpadów, lecz jedynie ich objętość.

Odnosząc ilość zdeponowanych odpadów do podziału na składowiska czynne i zamknięte można stwierdzić, że do grupy I należało 10 składowisk zamkniętych i 0 składowisk czynnych, natomiast do grupy II 18 składowisk zamkniętych oraz 10 czynnych. W grupie III było 13 składowisk zamkniętych i 10 składowisk czynnych. Do ostatniej grupy IV należało 8 składowisk zamkniętych oraz 13 czynnych. Największym składowiskiem odpadów komunalnych w województwie łódzkim jest czynne składowisko w Ruszczyne, najmniejszym zamkniętym zaś składowisko w Jankowie. Rozmiar składowiska ma istotne znaczenie, ponieważ w przypadku małych składowisk odpadów niemożliwa jest ekonomicznie opłacalna produkcja energii z biogazu, jak również zwiększa się zagrożenie emisji zanieczyszczeń do środowiska w porównaniu z dużymi składowiskami.

Na rys. 13 przedstawiono procentowy udział poszczególnych grup, określający ilość zdeponowanych odpadów na składowiskach zamkniętych i otwartych. W województwie łódzkim ponad 40% to składowiska, na których zdeponowano poniżej 10 tysięcy Mg odpadów, jedynie 24% stanowią składowiska, gdzie zgromadzono powyżej 100 tysięcy Mg odpadów.



46 Rys. 13. Procentowy podział składowisk ze względu na ilość deponowanych odpadów (opracowanie własne)

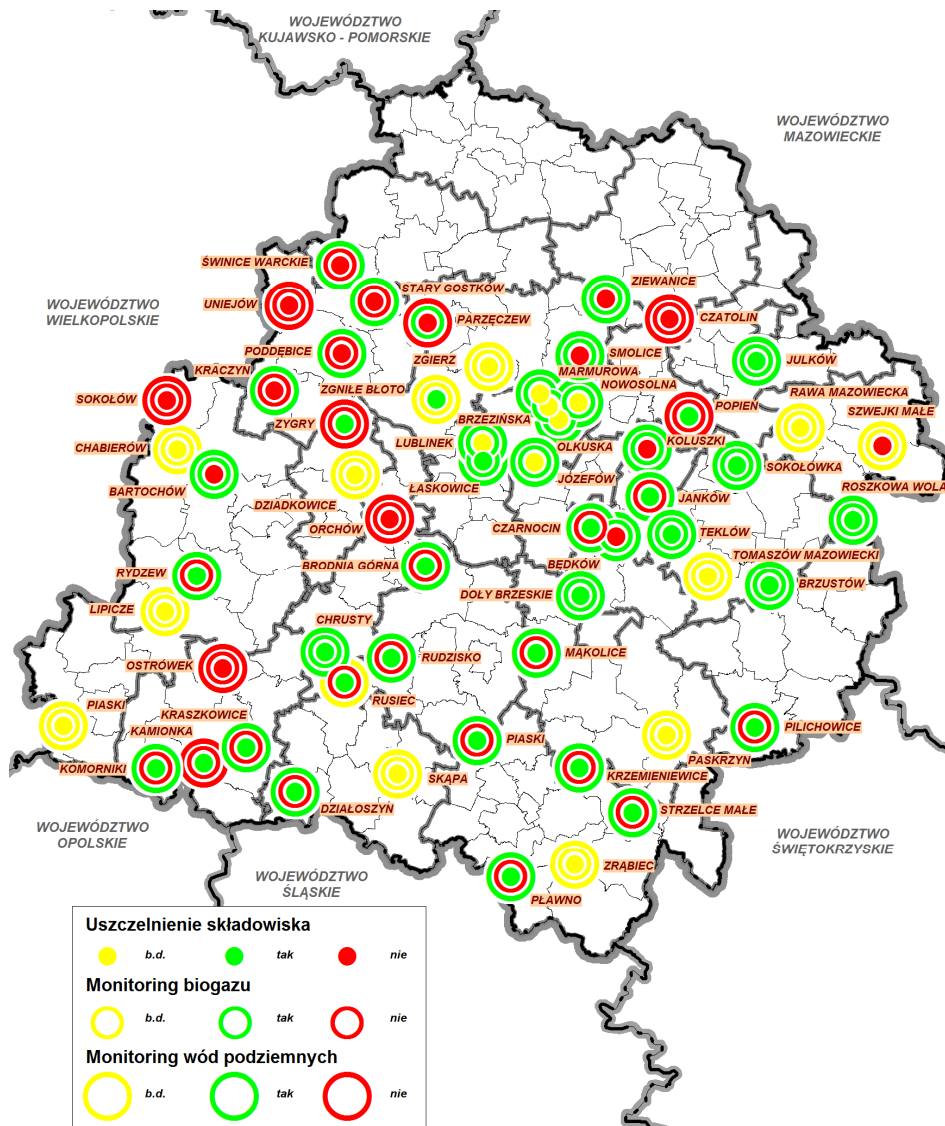
W analizie zamkniętych składowisk odpadów komunalnych w województwie łódzkim brano pod uwagę system izolacji składowiska od środowiska (naturalny lub sztuczny), system monitoringu powstającego biogazu i wód podziemnych. Na podstawie dostępnych danych dotyczących systemu uszczelnienia składowiska, można stwierdzić, że na 59 składowisk zamkniętych, 27 ma taki system. Na 16 składowiskach zamkniętych nie występuje system uszczelnienia, natomiast dla pozostałych 16 brak jest informacji na ten temat. Uszczelnienie dna składowiska jest zaś bardzo istotne, a jego brak powoduje przedostawanie się zanieczyszczeń (*odcieków*) do wód podziemnych.

System monitoringu wód podziemnych jest prowadzony na 36 z 59 zamkniętych składowisk. Na 9 nie jest prowadzony taki monitoring, a dla 14 następnym brak jest danych. Występowanie zanieczyszczeń w wodach podziemnych może być skutkiem braku warstwy izolującej bądź jej uszkodzeniem. Rozmieszczenie zamkniętych składowisk odpadów komunalnych w województwie łódzkim przedstawiono na rys. 14.

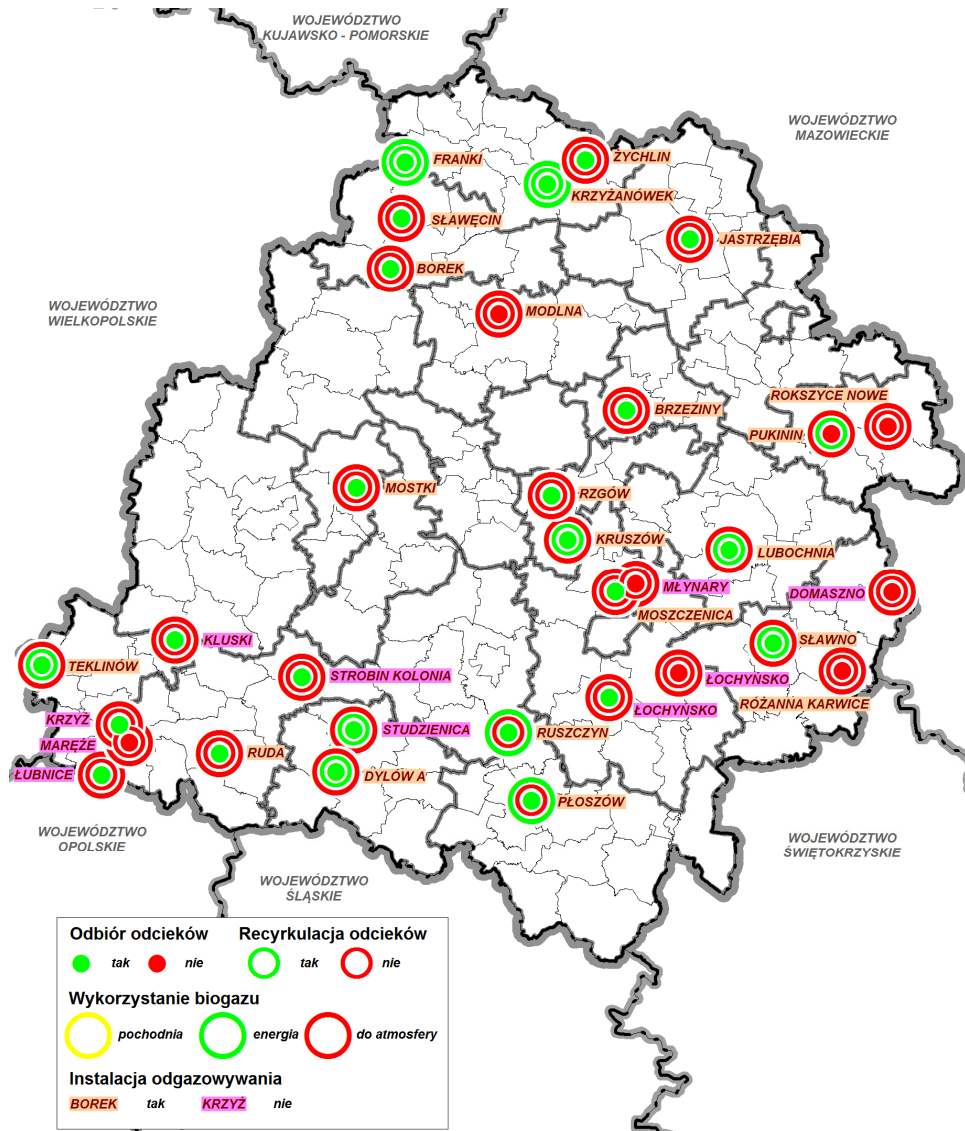
Kolejnym elementem brany pod uwagę w charakterystyce zamkniętych składowisk odpadów jest monitoring powstającego biogazu, który prowadzono na 20 składowiskach, na aż 27 nie był on prowadzony. Dla 12 składowisk brak jest informacji na ten temat. Pomiar powstającego biogazu pozwala określić procesy zachodzące w odpadach, jak również zdefiniować stopień zagrożenia wynikający z produkcji metanu, który wchodzi w skład biogazu.

Zamknięte składowiska w Chrustach, Dołach Brzeskich, Brzustowie, Tekłowie, Julkowie oraz Łaskowicach mają system uszczelnienia, monitoringu wód podziemnych oraz powstającego biogazu. Natomiast składowiska w Czatolinie, Uniejowie, Sokołowie, Orchowiu i Ostrówku nie mają uszczelnienia, jak również monitoringu wód podziemnych i biogazu. Z kolei dla składowisk w Chabierowie, Lipiczu, Piaskach, Skąpie, Zrąbcu, Paskrzynie, Tomaszowie Mazowieckim, Rawie Mazowieckiej i Zgierzu brak jest danych o uszczelnieniu, jak również o monitoringu wód podziemnych i powstającego biogazu.

Na szczególną uwagę zasługuje składowisko Nowosolna, które nie ma uszczelnienia. Na skutek migracji powstającego biogazu doszło do serii wybuchów metanu w piwnicach okolicznych domów. Celem zainstalowanego tam systemu odgazowania było ograniczenie migracji powstającego biogazu. W wyniku zbyt dużego podciśnienia w systemie odgazowania następowało obniżenie stężenia metanu i tym samym odbierany biogaz mógł być spalany w pochodni. W roku 1994 wydajność odgazowywania składowiska wynosiła 250 m³/h, a w 2002 225 m³/h [5]. Sensowne wydaje się wykorzystanie tak dużych ilości spalanego biogazu do produkcji ciepła. Gdyby składowisko posiadało system uszczelnienia, istniałaby możliwość wykorzystania powstającego biogazu do produkcji energii elektrycznej i ciepła.



Rys. 14. Spis zamkniętych składowisk odpadów komunalnych w województwie łódzkim (mapę opracowano w Biurze Planowania Przestrzennego Województwa Łódzkiego w Łodzi)



Rys. 15. Opis czynnych składowisk odpadów komunalnych w województwie łódzkim (mapę opracowano w Biurze Planowania Przestrzennego Województwa Łódzkiego w Łodzi)

Analizując dane dotyczące czynnych składowisk odpadów komunalnych można stwierdzić, że odbiór odcieków z dna składowiska jest prowadzony aż na 25 z 33 obiektów. Odbiór odcieków z dna składowiska zmniejsza ryzyko zanieczyszczenia wód podziemnych. Odebrane odcieki są podczyszczane i kierowane do oczyszczalni lub zawracane do składowiska (recykulowane), w celu utrzymania optymalnej wilgotności dla mikroorganizmów, które dokonują rozkładu materii organicznej w odpadach. Niestety recykulacja odebranych odcieków jest prowadzona jedynie na 10 z 33 składowisk. Na 19 z 33 czynnych składowisk zainstalowano systemy odgazowywania, przy czym odprowadzany biogaz trafiał bezpośrednio do atmosfery. Jedynie na 4 składowiskach (Franki, Krzyżanówek, Ruszczyn i Płoszów) powstający biogaz jest wykorzystywany do produkcji energii. Brak systemu odgazowywania odnotowano aż na 10 z 33 składowisk. Uwalnianie powstającego biogazu do atmosfery jest niepożądane ze względu na właściwości metanu. Jedynie składowiska we Frankach i Krzyżanówku mają systemy odbioru odcieków, recykulacji, odgazowywania i produkcji energii z biogazu, co czyni je najbardziej nowoczesnymi i sprawia, że wywierają najmniejszy niekorzystny wpływ na środowisko. Składowiska w Marężach, Łochyńsku, Młynarach i Domasznie nie dysponują systemem odbioru odcieków, recykulacji i odgazowywania. Rozmieszczenie czynnych składowisk odpadów komunalnych w województwie łódzkim przedstawiono na rys. 15.

8. Opis produkcji biogazu i energii ze składowisk odpadów komunalnych

Istnieje wiele modeli przedstawiających szybkość produkcji biogazu czy też metanu ze składowisk. Model LandGem opisuje produkcję metanu wykorzystując kinetykę pierwszego rzędu. Do zaprezentowanego modelu potrzebne są informacje dotyczące potencjału powstawania metanu, ilości deponowanych odpadów rocznie na składowisku, jak również stałej opisującej powstawanie metanu [15]. Kolejnym modelem szeroko stosowanym do opisu szybkości produkcji biogazu ze składowisk jest model IPCC [35]. Model ten również opiera się na kinetyce pierwszego rzędu, przy czym występuje w nim podział na odpady łatwo-, średnio- i trudnobiodegradowalne. Ze względu na brak możliwości ustalenia składu odpadów deponowanych na składowiskach w poszczególnych latach, do obliczeń potencjału produkcji biogazu wykorzystano metodę Rattenberga/Tabasarana [20].

Skumulowaną produkcję biogazu po nieskończeniu długim czasie wyliczono z równania:

$$G_{sk\infty} = 1,87 \cdot C(0,014 \cdot T_m + 0,28)$$

gdzie:

$G_{sk\infty}$ – skumulowana produkcja biogazu po nieskończeniu długim czasie [m^3/Mg odpadów];

C – zawartość węgla w materii organicznej znajdującej się w odpadach [kg/Mg odpadów];

T_m – temperatura w złożu odpadów [$^{\circ}C$].

Zawartość węgla w materii organicznej znajdującej się w odpadach przyjęto na poziomie 200 kg/Mg odpadów, a temperaturę w złożu odpadów (T_m) = $30^{\circ}C$, zgodnie z danymi literaturowymi [20]. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że z 1 Mg odpadów powstaje $261,8 \text{ m}^3$ biogazu.

Szybkość produkcji biogazu na składowisku czynnym po określonym czasie t_1 policzono ze wzoru:

$$Gt_{wz} = G_{sk\infty} (1 - e^{-0,096 \cdot t_1}) M \cdot mg$$

gdzie:

Gt_{wz} – szybkość produkcji biogazu z odpadów po czasie t_1 [m^3/rok];

t_1 – czas liczony od rozpoczęcia eksploatacji składowiska [rok];

M – ilość odpadów składowanych rocznie na składowisku [Mg odpadów];

mg – zawartość frakcji organicznej w odpadach ulegająca rozkładowi [ułamek dziesiętny].

Średnia zawartość ulegającej rozkładowi frakcji organicznej w odpadach wynosi w przybliżeniu $0,4$ [20]. Dla składowiska, które jest zamknięte, szybkość produkcji biogazu po czasie t_2 można obliczyć ze wzoru:

$$Gt_{wc} = Gt_{wz \max} (e^{-0,105 \cdot t_2})$$

gdzie:

- t_2 – czas od zamknięcia składowiska [rok];
 G_{twc} – szybkość produkcji biogazu ze składowiska po czasie t_2 od zamknięcia składowiska [m^3/rok];
 $G_{twz maks.}$ – maksymalna szybkość produkcji biogazu ze złoza [m^3/rok].

Ilość energii możliwą do wyprodukowania z danego składowiska w ciągu roku obliczono przy założeniu, że współczynnik uwzględniający rzeczywisty strumień biogazu do pozyskania w porównaniu z obliczonym jest równy 0,6 oraz współczynnik wydajności produkcji energii z biogazu w układzie kogeneracyjnym wynosi 0,8.

Aby można było opłacalnie wykorzystywać biogaz do produkcji energii w silniku spalinowym, szybkość produkcji biogazu powinna być większa od 100 m^3/h [25]. Jeżeli biogaz jest wykorzystywany wyłącznie do produkcji energii elektrycznej w silniku spalinyowym, szybkość produkcji biogazu nie powinna być mniejsza od 150 m^3/h , przez okres co najmniej 10 lat [24].

W pracy przedstawiono analizę produkcji biogazu z czynnych, jak i z 4 zamkniętych (w Łaskowicach, Dołach Brzeskich, Bartochowie i Julkowie) składowisk odpadów komunalnych w województwie łódzkim. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie składowisk, dla których obliczono potencjał tworzenia biogazu w roku 2011. Składowiska zamknięte w tabeli oznaczono tłem jasnoszarym. Tłem ciemnoszarym zaznaczono składowiska czynne, na których powstający biogaz jest wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej (we Frankach, Krzyżanówku, Płosznie i Ruszczynie).

Tabela 1

Spis składowisk odpadów komunalnych, dla których obliczono szybkość produkcji biogazu

Lp.	Powiat	Lokalizacja składowiska	Rozpoczęcie eksploatacji	R [Mg/rok]
1	bełchatowski	Wola Kruszyńska	1981	19 876
2	brzeziński	Brzeziny	1975	5 365
3	kutnowski	Franki	2000	95 388
4	kutnowski	Krzyżanówek	1987	16 019
5	kutnowski	Żychlin	1960	336
6	łęczycki	Sławęcın	1996	125

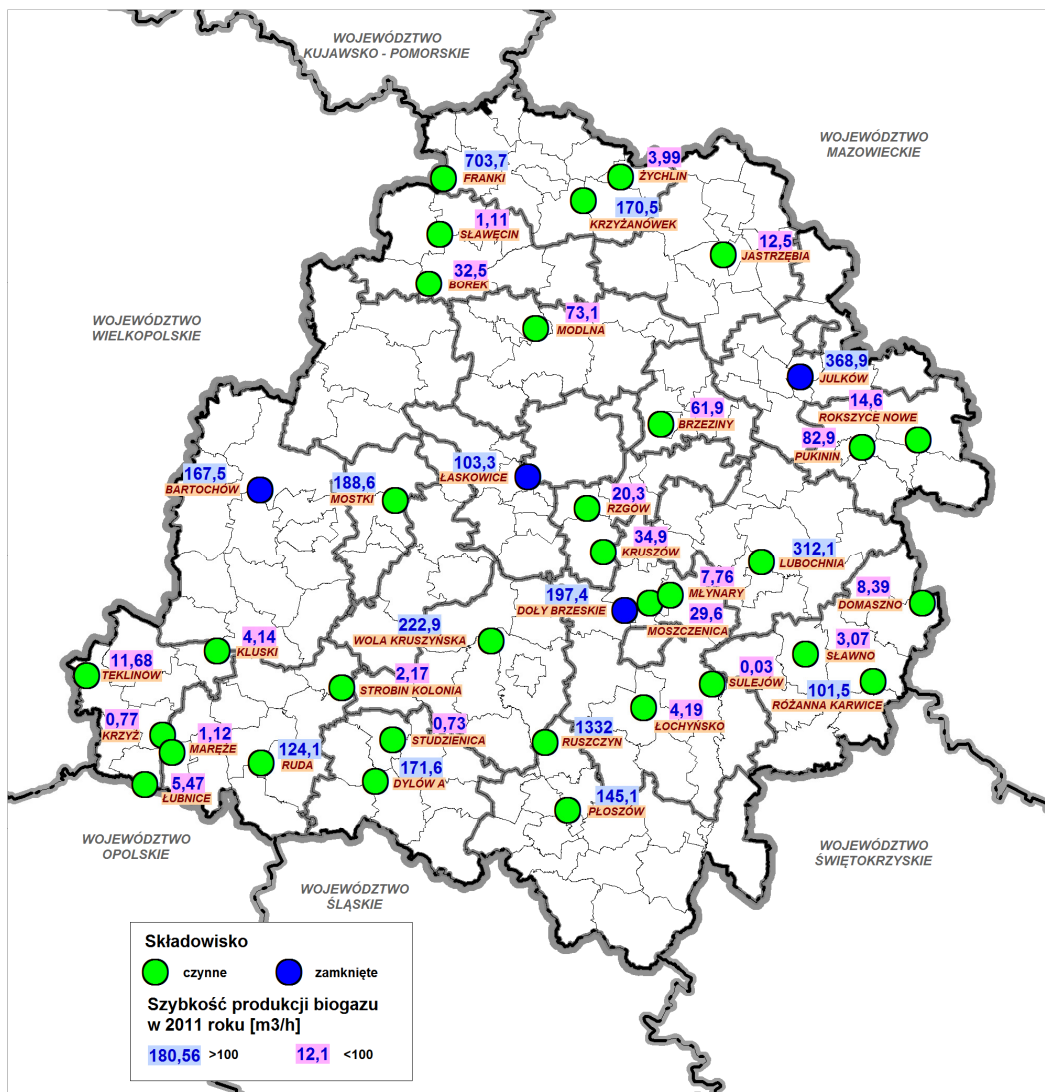
7	łęczycki	Borek	1990	3 182
8	łowicki	Jastrzębia	1964	1 058
9	grodzki m. Łódź	Łaskowice	1998	24 631
10	łódzki wschodni	Kruszów	1980	3 099
11	łódzki wschodni	Rzgów	1999	2 608
12	opoczyński	Różanna	1982	9 108
13	opoczyński	Sławno	1997	360
14	opoczyński	Domaszno	1982	802
15	pajęczański	Stuziennica	1995	80
16	pajęczański	Dylów	2002	26 776
17	piotrkowski	Doły Brzeskie	1982	24 963
18	piotrkowski	Łochońsko	1992	426
19	piotrkowski	Młynary	1992	790
20	piotrkowski	Sulejów	1973	113
21	piotrkowski	Moszczenica	1993	3 080
22	radomski	Płoszyn	1973	12 498
23	radomski	Ruszczyń	2001	192 674
24	rawski	Pukinin	1994	8 837
25	rawski	Rokszycy Nowe	1992	1 486
26	sieradzki	Bartochów	1978	16 419
27	skierniewicki	Julków	1972	39 389
28	tomaszowski	Lubochnia	2002	48 712
29	wieluński	Strobin Kolonia	1998	266
30	wieluński	Maręże	1993	117
31	wieluński	Ruda	1990	12 160
32	wieruszowski	Krzyż	1996	87
33	wieruszowski	Kluski	1992	422
34	wieruszowski	Łubnice	1994	584
35	wieruszowski	Teklinów	1998	1 429
36	zduńskowolski	Mostki	1989	18 199
37	zgierski	Modlna	1978	6 409

Źródło: oprac. własne.

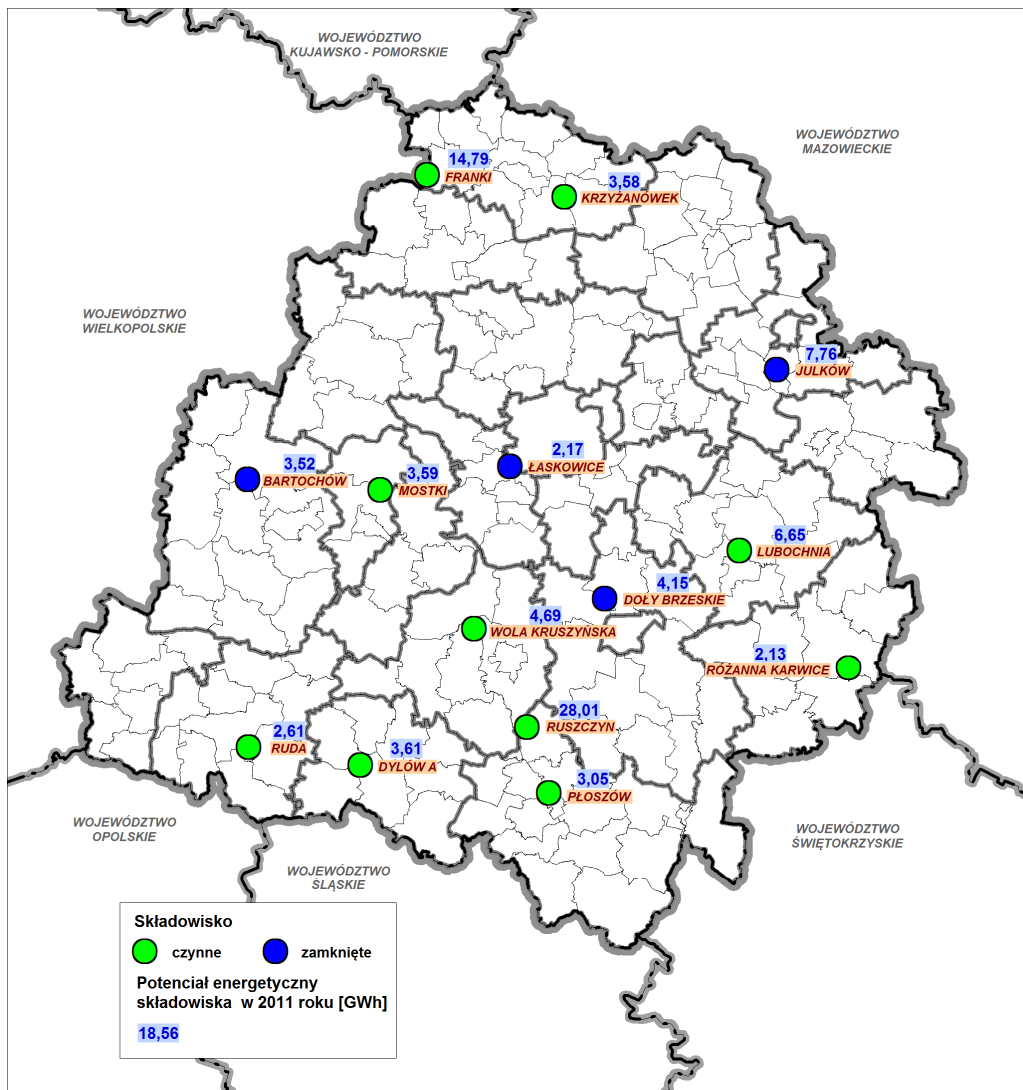
Obliczone szybkości produkcji biogazu ze składowisk przedstawionych w tab. 1 w roku 2011 zademonstrowano na rys. 16. Na zamkniętych składowiskach w Łaskowicach, Dołach Brzeskich, Bartochowie i Julkowie szybkości produkcji biogazu była większa od 100 m³/h. Należy jednak pamiętać, że wraz z upływem czasu od zamknięcia składowiska szybkość produkcji biogazu maleje. Natomiast w czynnych składowiskach szybkość produkcji biogazu rośnie do momentu zamknięcia składowiska. Szybkość produkcji biogazu w roku 2011 w składowisku w Łaskowicach wynosiła 103,3 m³/h, w Dołach Brzeskich – 197,4 m³/h, Bartochowie – 167,5 m³/h i Julkowie – 368,9 m³/h.

Szybkość produkcji biogazu w roku 2011 była mniejsza od 100 m³/h aż dla 23 czynnych składowisk. Natomiast szybkość produkcji biogazu mniejszą od 10 m³/h stwierdzono na 13 spośród 33 czynnych składowisk. Dla 10 składowisk odpadów szybkość produkcji biogazu była większa od 100 m³/h (Wola Kruszczyńska, Franki, Krzyżanówek, Różana, Dylów, Płoszów, Ruszczyń, Lubochnia, Ruda oraz Mostki). Największa potencjalna szybkość produkcji biogazu występuje na składowisku w Ruszczynie (1332 m³/h). Na szczególną uwagę zasługują składowiska w Woli Kruszczyńskiej, Różanej, Dylowie, Lubochni, Rudzie oraz Mostkach, gdyż wysoka szybkość produkcji biogazu może być tam wykorzystana do produkcji energii.

Na rys. 17 przedstawiono potencjalną ilość energii, jaką można było wyprodukować w roku 2011 ze składowisk, w których szybkość produkcji biogazu była większa od 100 m³/h. Ilość energii jaką można było uzyskać w roku 2011 dla 4 zamkniętych składowisk wynosiła 17,60 GWh. Natomiast z 10 czynnych składowisk w roku 2011 można było wyprodukować 73,01 GWh energii. Ilość energii możliwa do pozyskania w tymże roku ze składowisk we Frankach, w Krzyżanówku, Płosznie i Ruszczynie wynosiła 49,44 GWh. Dla porównania, ilość wyprodukowanej energii elektrycznej ze składowisk we Frankach, Krzyżanówku, Płosznie i Ruszczynie wyniosła w rzeczywistości 14,3 GWh [10]. Należy podkreślić, że podczas obliczania ilości energii możliwej do wyprodukowania w roku 2011 założono, że sprawność wykorzystania biogazu do produkcji energii wynosi 0,8 (układ kogeneracji – równoległe wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej) [4]. Na składowiskach we Frankach, w Krzyżanówku, Płosznie i Ruszczynie sprawność wykorzystania biogazu do produkcji energii elektrycznej wynosiła w przybliżeniu 0,4.



Rys. 16. Potencjalna szybkość produkcji biogazu w roku 2011 z wybranych składowisk odpadów komunalnych w województwie łódzkim (mapę opracowano w Biurze Planowania Przestrzennego Województwa Łódzkiego w Łodzi)



Rys. 17. Potencjalna ilość energii jaka mogła być wyprodukowana w roku 2010 ze składowisk odpadów komunalnych w województwie łódzkim (mapę opracowano w Biurze Planowania Przestrzennego Województwa Łódzkiego w Łodzi)

Podsumowanie

W skład odpadów komunalnych wchodzi materia organiczna, która w wyniku procesów biochemicznych rozkłada się do dwutlenku węgla oraz metanu. Ze względu na wysoką wartość opałową metanu, powstający biogaz teoretycznie może być wykorzystany do produkcji energii. W praktyce szybkość produkcji biogazu ze składowiska musi pozostawać na odpowiednio wysokim poziomie, gdyż przy małej ilości powstającego biogazu produkcja energii staje się nieopłacalna. Dla składowisk o małych szybkościach produkcji biogazu, w celu redukcji emisji metanu może być zastosowany biofiltr lub pochodnia. Gdy składowisko nie ma systemu uszczelnienia dna oraz następuje emisja zanieczyszczeń, wskazane jest zastosowanie aerobowej stabilizacji odpadów. Zagospodarowanie biogazu powstającego na składowisku jest istotne również ze względu na fakt, że metan powoduje 21 razy większy efekt cieplarniany niż dwutlenek węgla.

Przeprowadzona analiza dotycząca składowisk odpadów komunalnych w województwie łódzkim pozwala określić, gdzie powstający biogaz może być wykorzystany do produkcji energii. Decyzje odnoszące się do energetycznego wykorzystania biogazu należy podejmować szybko, gdyż na zamkniętych składowiskach produkcja biogazu wraz z upływem czasu maleje.

LITERATURA

- [1] Barlaz M. A., Green R. B., Chanton J. P., Goldsmith C. D., Hater R., *Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions*, „Environmental Science of Technology” 2004, 38, 4891–4899.
- [2] Biletewski B., Härdtle G., Marek K., *Podręcznik gospodarki odpadami*, Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa 2003.
- [3] Campman C., Yates, A., *Bioreactor Landfills: An Idea whose time has come*, MSW Management, September/October 2002.
- [4] Curkowski A., Mroczkowski P., Oniszk-Popławska A., Wiśniewski G., *Biogaz rolniczy – produkcja i wykorzystanie*, Mazowiecka Agencja Energetyczna, Warszawa 2009.
- [5] Dudek J., Klimek P., *Doświadczenia związane z energetycznym wykorzystaniem biogazu ze składowisk odpadów komunalnych*, „Polityka Energetyczna” 2008, 11, 2.
- [6] Dudek J., Klimek P., Kołodziejak P., Niemczewska J., Zalewska-Bartosz J., *Technologie energetycznego wykorzystania biogazu*, Instytut Nafty i Gazu, Kraków 2010.

- [7] Figueroa R. A., *Gasemissionsverhalten abgedichteter Deponien*, ed. R. Stegmann, Hamburger Berichte Bd. 13, Economica Verlag, Bonn 1998.
- [8] Grubler A., *Technology and global change*, Cambridge University Press, Cambridge 1998.
- [9] GSC, GeoSyntec Consultants, *Landfill Compliance Study Task 7 Report-Study of Emerging Technologies in Waste Management for MSW Landfills*, California Integrated Waste Management Board, Sacramento, California, December 2003.
- [10] GUS, *Ochrona Środowiska 2009*, Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa 2009.
- [11] Hanashima M., Yamasaki K., Kuroki T., Onishi K., *Heat and gas flow analysis in semiaerobic Landfill*, „Journal of the Environmental Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers” 1981, 107, 1–9.
- [12] Hater G., Green R., Vogt G., Davis-Hoover W., Carson D., Thorneloe S., Kremer F., *Landfills as bioreactors: research at the outer loop landfill*, Louisville, Kentucky 2003 [First interim report. EPA 600-R-03-097].
- [13] Heyer K.-U., Hupe K., Ritzkowski M., Stegmann R., *Technical implementation and operation of the low pressure aeration of landfills*, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari 2001.
- [14] Hokes J., *Significance of Biogas Production in Waste Tips*, „Waste Management & Research” 1983, 1, 323–335.
- [15] Jacobs J., Scharff H., *Comparison of methane emission models to methane emission measurements*, NV Afvalzorg, The Netherlands 2001.
- [16] Jędrzak A., *Biologiczne przetwarzanie odpadów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
- [17] Kaczorek K., Ledakowicz S., *Analiza pracy składowiska odpadów z punktu widzenia inżynierii bioreaktorowej*, „Biotechnologia” 2005, 2, 69–87.
- [18] Kaczorek K., Ledakowicz S., *Kinetics of nitrogen removal from sanitary landfill leachate*, „Bioprocess and Biosystems Engineering” 2006, 29, 291–304.
- [19] Klass D. L., *Methane from Anaerobic Fermentation*, „Science” 1984, 223, 1021–1028.
- [20] Klimek A., Wysokiński L., Zawadzka-Kos M., Oseka M., Chrzęszcz J., *Poradnik metodyczny w zakresie PRTR dla składowisk odpadów komunalnych*, Warszawa 2010.
- [21] KPGO, *Krajowy plan gospodarki odpadami 2010*, Uchwała Rady Ministrów, nr 233 z dn. 29.12.2006.
- [22] Ledakowicz S., Krzystek L., *Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego*, „Biotechnologia” 2005, 3, 165–183.
- [23] Lelieveld J., Crutzen P. J., Dentener F. J., *Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane*, „Tellus B” 1998, 50, 128.
- [24] Lewicki R., *Wytyczne w zakresie kontroli i monitoringu gazu składowiskowego*. Sfinansowano ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej na zamówienie Ministra Środowiska, Warszawa 2010.

- [25] Lipniacka-Piaskowska A., *Funkcjonowanie składowiska odpadów z recykulacją odcieków*. Praca doktorska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin 2010.
- [26] Long Y., Hua L., Shen D. S., *Nitrogen transformation in the hybrid bioreactor landfill*, „Biore-source Technology” 2009, 100, 2527–2533.
- [27] Miksch K., Sikora J., *Biotechnologia Ścieków*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [28] Oleszkiewicz J., *Eksploatacja składowiska odpadów – poradnik decydenta*, LEM PROJEKT s.c., Kraków 1999.
- [29] Pawłowska M., *Efektywność mikrobiologicznego utleniania metanu w biofiltrach w zależności od rodzaju materiału stanowiącego wypełnienie*, VIII Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Kompleksowe i Szczegółowe Problemy Inżynierii Środowiska, Darłówko 2007, http://wbiis.tu.koszalin.pl/konferencja/konferencja2007/2007/39pawlowska_t.pdf.
- [30] Pohland F. G., *Sanitary landfill stabilization with leachate recycle and residual treatment*, Cincinnati, Ohio 1975 [EPA 600/2-75-043].
- [31] Ritzkowski M., Heyer K. U., Stegmann R., *Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills*, „Waste Management” 2006, 26, 356–372.
- [32] Rosik-Dulewska C., *Podstawy gospodarki odpadami*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
- [33] Rożej A., Stepniewski W., Małek W., *Bakterie metanotroficzne w ekosystemach*, „Postępy Mikrobiologii” 1999, 38, 295–313.
- [34] Schatz S., *Die systematische Befeuchtung von Deponien als Mittel zur Verkürzung des Nachsorgezeitraums* 2003: www.au-gmbh.de/vortrage.html.
- [35] Wangyao K., Towprayoon S., Chiemchaisri Ch., Shabbir H., Gheewala S. H., Nopharatana A., *Application of the IPCC Waste Model to solid waste disposal sites in tropical countries: case study of Thailand*, „Environmental Monitoring and Assessment” 2010, 164, 249–261.
- [36] Weathers L. J., Mathis N. P., Wolfe K., *Physical and chemical characteristics of solid waste from an aerated bioreactor landfill*, Proceedings from the SWANA 6th Annual Landfill Symposium, San Diego, CA 2001.
- [37] Zanetti M. C., *Aerobic biostabilization of old MSW landfills*, „American Journal of Engineering and Applied Science” 2008, 1, 393–398.
- [38] Zhang H., He P., Shao L., *Methane emissions from MSW landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation*, „Atmospheric Environment” 2008, 42, 5579–5588.
- [39] Żygadło M., *Strategia gospodarki odpadami komunalnymi*, Wydawnictwo: Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Poznań 2001.