

**prof. dr hab. Kazimierz Jankowski**  
**mgr inż. Anna Kaczorek**  
**dr inż. Beata Wiśniewska-Kadżajan**  
**dr inż. Elżbieta Malinowska**  
**prof. nzw. dr hab. inż. Henryk Wyrębek**  
Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach

## **Rozwój technologii w zakresie utylizacji odpadów komunalnych**

### **Development of technology in regard to municipal wastes utilization**

**Streszczenie:** *Rozwój cywilizacyjny oraz stały wzrost konsumpcji przyczynia się do zwiększenia ilości odpadów komunalnych, bardzo zróżnicowanych pod względem składu fizycznego i chemicznego. Zróżnicowanie składu zależy głównie od wyposażenia budynków w urządzenia techniczno-sanitarne (głównie sposobu ogrzewania), rodzaju zabudowy, stopy życiowej mieszkańców i wielu innych czynników. Zróżnicowanie właściwości technologicznych odpadów z poszczególnych środowisk często może być tak znaczne, że w istotny sposób rzutuje na wybór metody ich unieszkodliwiania. Wzrastające wymogi w zakresie ochrony środowiska powodują znaczne ograniczenie terenów, na których można lokalizować składowiska odpadów, a wzrost kosztów pozyskiwania terenów pod budowę zakładów unieszkodliwiania odpadów stwarza konieczność stosowania intensywnych technologii, pozwalających na minimalizację ich ujemnego oddziaływania na środowisko naturalne.*

**Słowa kluczowe:** odpady komunalne, utylizacja, recykling, biogaz, składowanie, piroliza

**Abstract:** *The development of civilization and the permanent increase in consumption helps to increase the amount of municipal waste, very different in terms of physical and chemical composition. Variation in composition depends primarily on equipping buildings in technical and sanitary equipment (mainly the way of heating), the type of building, the living standards of the inhabitants, and many other factors. The diversity of technological characteristics wastes from different origins can often be so large that it significantly affects the choice of disposal method. The increasing requirements of environmental protection cause a significant reduction in the areas where you can locate a land fill and increase the cost of acquiring land for the construction of waste disposal facilities necessitates the use of intensive technologies, allowing to minimize the negative impact on the environment.*

**Keywords:** municipal waste, disposal, recycling, biogas, storage, pyrolysis

#### **Wstęp**

W świetle ustawy odpady komunalne to odpady powstające w gospodarstwach domowych, a także odpady nie zawierające odpadów niebezpiecznych, pochodzące od innych wytwórców odpadów, które ze względu na swój charakter lub skład są podobne do odpadów powstających w gospodarstwach domowych<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r. z późniejszymi zmianami (Dz. U. 01.62.628).

Jak wynika z danych obecnego planu gospodarowania odpadami, w Polsce w 2008 roku wyprodukowano 12 101 tys. Mg odpadów komunalnych. Jest to ogromna ilość materii, którą trzeba zagospodarować w taki sposób, aby nie zagrażało to środowisku naturalnemu. Odpady te stanowią poważny problem współczesnej gospodarki i stawiają wyzwanie myśli technicznej i ekonomiczno-prawnej<sup>2</sup>.

Dodatkowe utrudnienia w gospodarowaniu odpadami stanowią ciągłe zmiany jego składu, który jest uzależniony od wielu czynników, takich jak: poziom dochodów poszczególnych mieszkańców, położenie geograficzne, klimat, przyzwyczajenia ludzi itp., a także kierunki rozwoju gospodarczego, zmiany poziomu życia mieszkańców, postęp techniczny i technologiczny<sup>3</sup>. Jak również fakt, że w skład odpadów komunalnych wchodzi bardzo różne substancje o różnych właściwościach np. materiały organiczne, makulatura, szkło, metale itp. (Baran i Turski 1999). Niektórzy badacze (Skolimowski 2005, Meller i in. 2009) próbowali określić skład morfologiczny odpadów komunalnych w różnych miastach Polski oraz w różnych okresach i stwierdzili znaczne różnice. Zawartość odpadów organicznych wahała się w granicach od 18,3% do 43,7% w zależności od miejsca i czasu badania. Znaczne różnice występują także w odniesieniu do tworzyw sztucznych, których ilość znacznie wzrasta: w 2004 roku wynosiła około 16,5%, natomiast w 2009 wahała się od 16% do nawet 29%. W odpadach komunalnych wydzielono także znaczne ilości papieru i tektury (15-24%) (Bajorek i in. 2009).

Jak podaje Rosik-Dulewska (2011), podstawowym elementem racjonalnego gospodarowania odpadami komunalnymi jest ich selektywna zbiórka lub segregacja. Selektywna zbiórka odpadów może być prowadzona na różne sposoby, tzn. poprzez ustawianie kontenerów w wybranych punktach miasta, poprzez ustawianie kilku kontenerów w ogrodzonym miejscu, które są przeznaczone dla 10-25 tys. gospodarstw domowych, oraz system zbiórki „u źródła”, który jest najbardziej efektywny (Baran i Turski 1999). W Polsce w 2008 r. odpady segregowane stanowiły 6,8% wszystkich zebranych odpadów komunalnych, dodatkowo 3,59% wysegregowano, pozostała część trafiła na składowiska (Rosik-Dulewska 2011). W niektórych krajach, np. w Austrii już w latach 90. XX w. segregacji podlegało 18% odpadów, w Wielkiej Brytanii 12,5%. Dane te pokazują, jak daleko jest Polska pod tym względem za innymi krajami.

Kraje Wspólnoty Europejskiej kierują działania dotyczące gospodarki odpadami najpierw na zapobieganie ich powstawaniu, a w następnej kolejności na bezpiecznym ich unieszkodliwianiu i wykorzystaniu.

Najwięcej odpadów jest składowanych, co powoduje skutki sanitarne, ekologiczne i gospodarcze. Dlatego zmierza się do kompleksowego przerobu odpadów komunalnych, tj. segregacji, unieszkodliwiania frakcji organicznej, spalania oraz recyklingu (Rosik-Dulewska 2011).

<sup>2</sup> S. Stelmach, A. Sobolewski, *Piroliza – alternatywa spalania odpadów komunalnych*, „Gospodarka Pałiwami i Energią”, 7/1999, 17-21; Ustawa z dnia 11 maja 2001 roku o obowiązkach przedsiębiorców w zakresie gospodarowania niektórymi odpadami oraz o opłacie produktowej i opłacie depozytowej.

<sup>3</sup> P. Beigl, *Prognozowanie zmian ilości i składu odpadów komunalnych*, Mat. VI Międzynarodowego Forum Gospodarki Odpadami. Poznań–Licheń Stary 2005; M. Malinowski, A. Krakowiak-Bal, J. Sikora, A. Woźniak, *Ilości generowanych odpadów komunalnych w aspekcie typów gospodarczych gmin województwa małopolskiego* „Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich”, nr 9/2009, s. 23-25.

## **Tradycyjne sposoby utylizacji odpadów komunalnych**

### ***Recykling***

Zasadą działania recyklingu jest maksymalizacja wykorzystania tych samych materiałów w kolejnych dobrach materialnych i użytkowych, z uwzględnieniem minimalizacji nakładów na ich przetwarzanie (Szołtysek 2009). Proces ten jest jedną z głównych technik przeciwdziałania powstawaniu odpadów prowadzącą do ograniczenia strumienia odpadów kierowanych na składowiska (Alwaeli 2007 a i b). W Polsce ustawa z dnia 11 maja 2001 roku nakłada obowiązek ponownego wykorzystania niektórych opakowań stosowanych w danym przedsiębiorstwie. W zależności od rodzaju opakowania poziom recyklingu, jaki powinno osiągnąć przedsiębiorstwo, waha się od 15% do 40% wyprodukowanych w ciągu roku. Jeśli tego nie osiągnie, musi zapłacić opłatę produktową. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 29 maja 2012 roku przedstawia zakładany poziom recyklingu papieru, metali, tworzyw sztucznych i szkła z odpadów komunalnych, który w roku 2014 ma wynosić 14% natomiast w 2020 aż 50% (Uchwała Rady 2012).

Recykling odpadów zapewnia wiele korzyści gospodarczych, takich jak: zwiększenie bazy surowcowej, obniżenie kapitałochłonności i energochłonności oraz zmniejszenie zużycia materiałów i kosztów produkcji, a co najważniejsze – jest bardzo korzystne dla środowiska naturalnego (Alwaeli 2007 a i b). Aby w Polsce wzrósł poziom recyklingu, konieczna jest zmiana myślenia ludzi i potraktowania odpadów jako źródła surowców, a nie jako śmieci składowanych na składowisku (Karpińska 2011).

### ***Składowanie odpadów komunalnych i jego wpływ na środowisko***

Składowanie odpadów na wysypiskach jest najbardziej rozpowszechnioną i najstarszą metodą ich unieszkodliwiania (Baran i Turski 1999). W 2011 roku na składowiska trafiło 78,8% odpadów komunalnych (Rocznik statystyczny 2012). Składowisko odpadów to zlokalizowany i urządzony według przepisów prawa obiekt budowlany, na którym odbywa się deponowanie odpadów. W Polsce odpady komunalne składowane są na składowiskach innych niż niebezpieczne i obojętne (Rosik-Dulewska 2011).

Według Rozporządzenia o katalogu odpadów, do odpadów komunalnych można zaliczyć między innymi wszelkie odpady pochodzące z gospodarstw domowych łącznie z frakcją wielkogabarytową oraz bateriami, biomasą z ogrodów i parków. Na wysypiskach odpadów komunalnych można także składować odpady przemysłowe o charakterze odpadów komunalnych (Baran i Turski 1999). Według ustawy o odpadach, na składowiskach innych niż niebezpieczne i obojętne zakazuje się deponowania odpadów ciekłych, żrących, wybuchowych, łatwopalnych, a także zakaźnych (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2003).

Odpady komunalne mogą być składowane na trzech rodzajach składowisk: niezorganizowanych, półorganizowanych i zorganizowanych. Składowiska niezorganizowane to naturalne zagłębienie terenu lub wyrobisko bez specjalnego przygotowania. Półorganizowane to takie, w których wykorzystuje się geomembranę, aby odizolować odpady od podłoża. Obie te metody stwarzają ogromne zagrożenie dla środowiska (Rosik-Dulewska 2011). Składowiska zorganizowane muszą mieć odpowiednią lokalizację, która uwzględnia kryteria hydrogeologiczne,

topograficzne i geotechniczne oraz posiada uszczelnione podłoże, czyli system odwadniania i oczyszczania ścieków, oraz ograniczoną emisję gazów (Baran i Turski 1999).

Według danych GUS, w 2011 roku w Polsce było 578 kontrolowanych czynnych składowisk odpadów komunalnych, które zajmowały 2349,5 ha powierzchni, a jak wynika z danych - ich liczba w ostatnich latach systematycznie maleje.

Według ustawy odpady przed umieszczeniem na składowisku powinny być poddane procesowi przekształcenia fizycznego, chemicznego lub biologicznego oraz segregacji, w celu ograniczenia zagrożenia dla życia i zdrowia ludzi lub dla środowiska, lub też ograniczenia ilości czy objętości składowanych odpadów. Proces sortowania polega na rozdzielaniu odpadów na frakcje różniące się cechami fizycznymi. Następnie odpady mogą ulegać rozdrobnieniu, czyli rozdzielaniu na części za pomocą siły w celu uzyskania produktu o określonym wymiarze cząstek. W następnej kolejności materiał może być prasowany, brykietowany lub granulowany (Korzeń 2001). Metody scalania odpadów mają kilka korzyści: powiększa się ich gęstość nasypowa, przeciwdziała powstawaniu pyłów, podwyższa się wartość użyteczną w transporcie i składowaniu.

Składowanie odpadów może być traktowane jako metoda uzupełniająca lub końcowy element procesu zagospodarowywania odpadów (Radlak 2008).

Składowisko odpadów komunalnych jest specyficznym bioreaktorem, w którym pod wpływem czynników atmosferycznych i mikroorganizmów dochodzi do rozkładu materii w procesach fizycznych, chemicznych i biologicznych, w warunkach tlenowych i beztlenowych (Rosik-Dulewska 2011). Powstające odcieki, pyły i gazy są zagrożeniem dla wód podziemnych i powierzchniowych, powietrza, gleby, roślin, a także dla ludzi i zwierząt. Składowiska odpadów powodują zanieczyszczenie wód powierzchniowych szczególnie blisko położonych rowów melioracyjnych metalami ciężkimi, takimi jak żelazo, mangan, cynk i chrom (Jagiello 2003). Wysypiska zanieczyszczają wody powierzchniowe na ogół tylko wtedy, gdy są w bezpośrednim z nimi kontakcie. Ocena zanieczyszczenia rzek położonych dalej jest w praktyce niemożliwe z powodu dużego rozcieńczenia. Wyraźnie niekorzystny wpływ nieuszczelnione składowiska mają na zawartość metali ciężkich w wodach podziemnych (Szymańska-Pulikowska 2003). Zanieczyszczenie wód podziemnych metalami ciężkimi zmniejsza się wraz z upływem czasu eksploatacji wysypiska (Szymańska-Pulikowska 2001).

Składowisko odpadów wywiera również znaczący wpływ na powietrze atmosferyczne. Michalcewicz i Nowak (2000) stwierdzili znaczny wzrost zawartości promieniowców w powietrzu w otoczeniu składowiska, mogących wywoływać choroby alergiczne u ludzi.

Nie stwierdzono wpływu wysypisk śmieci na skażenie gleby oraz roślinność w bliskim otoczeniu składowisk (Mocek i Owczarzak 2001, Szymańska-Pulikowska 2003, Niewiadomski i Tołoczko 2005). Chociaż Mocek i Owczarzak (2001) stwierdzili, że gleba w pobliżu składowisk odpadów jest znacznie bardziej zakwaszona, ma mniej przyswajalnych form makroskładników i ma wyższe zasolenie, co utrudnia wzrost roślin.

### **Produkcja biogazu z odpadów komunalnych**

Przemiany zachodzące w składowanych odpadach komunalnych powodują wydzielanie się biogazu. Gaz ten jest produktem beztlenowego rozkładu substancji organicznych zawartych w odpadach (Baran i Turski 1999). W skład tak powstającego gazu wchodzi metan 45-65%, dwutlenek węgla 25-35%, azot 7-10%, tlen poniżej 3% (Żuchowski i Ratuszyński 2003). Rosik-Dulewska (2011) podaje, że metan wydzielający się ze składowiska odpadów wywołuje około 30-krotnie większy efekt cieplarniany niż CO<sub>2</sub>. Z danych innych autorów wynika, iż w 1 tonie odpadów komunalnych znajduje się około 200 kg substancji, która ulegając rozkładowi może doprowadzić do powstania 160 m<sup>3</sup> gazu. Wytwarzany gaz wysypiskowy stwarza ogromne zagrożenie samozapłonu i wybuchu, a rozchodząc się może gromadzić się w fundamentach i piwnicach pobliskich budynków stwarzając zagrożenie eksplozją, zaś u ludzi zwiększać ryzyko chorób nowotworowych (Rosik-Dulewska 2011).

Biogaz można wykorzystać w celach energetycznych, dzięki czemu zmniejsza się zanieczyszczenia środowiska. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 24 marca 2003 roku oparte na Dyrektywie Rady UE 1999/31/EC nakazuje wyposażać składowiska odpadów w instalacje odprowadzające gaz, oczyszczające go i wykorzystywać do celów energetycznych. Jak podaje Rosik-Dulewska (2011), wartość opałowa biogazu ze składowisk waha się w granicach 16-24 MJ/m<sup>3</sup> odpadów. Metan może być alternatywnym źródłem energii i może być przetwarzany na energię elektryczną lub ciepłą. W tym celu na uszczelnionym wysypisku buduje się specjalne urządzenia do odprowadzenia i gromadzenia biogazu (Baran i Turski 1999). Linia technologiczna musi uwzględniać odbiór gazu z komór fermentacyjnych, oczyszczanie mechaniczne i odsiarczanie, magazynowanie w zbiornikach, osuszanie, spalanie robocze i awaryjne (Fischer i Krieg 2001). Szacuje się że w Polsce można uzyskać 430 mln m<sup>3</sup> metanu rocznie, co może odpowiadać 15 PJ/rok energii chemicznej zawartej w paliwie lub 150 MW mocy elektrycznej. Jest to możliwość uzyskania taniej energii przyjaznej środowisku, która w tej chwili jest tracona i powoduje zanieczyszczenie środowiska (Rosik-Dulewska 2011). Inwestycje w budowę elektrowni biogazowych są bardzo wysokie ale przy odpowiednim wykorzystaniu mogą zwrócić się już po 5 latach. Na wysypisku odpadów komunalnych w Gliwicach z 11 ha jego powierzchni uzyskuje się 680 m<sup>3</sup>/h biogazu (Błaszczak-Posteczka i Żukowski 2007).

### **Spalanie i kompostowanie jako termiczne metody ich utylizacji**

Termiczna utylizacja odpadów to procesy, w których istotną rolę w przekształceniu fizycznym bądź chemicznym materiału odgrywa ciepło. Według danych GUS zaledwie 1% zebranych w 2001 roku odpadów komunalnych zostało unieszkodliwionych termicznie. Ustawa o odpadach z 27 kwietnia 2001 roku zalicza do termicznego przekształcania odpadów: spalanie, pirolizę, zagazowanie oraz proces plazmowy.

### **Spalanie odpadów**

Proces spalania to szybko przebiegający egzotermiczny proces utleniania prowadzony w piecach rusztowych, jest on kombinacją nakładających się na siebie różnych zjawisk, tj. suszenia, odgazowania, zgazowania i całkowitego spalania (Rosik-Dulewska 2011)

Spalanie odpadów jest skuteczną metodą pozbywania się śmieci, która pozwala na zmniejszenie ich ilości przekazywanych na składowiska. Termiczna przeróbka odpadów ma na celu (Baran i Turski 1999):

- spalenie zawartych w nich składników palnych i wykorzystanie energii z tego procesu,
- likwidację zawartych w odpadach organizmów chorobotwórczych,
- zmniejszenie masy i objętości odpadów,
- przekształcenie niepalnych składników w formę odpowiednią do składowania lub dalszego wykorzystania.

Pozostałością po spaleniu odpadów są substancje mineralne: żużel i popiół, złom metali, popioły lotne (Rosik-Dulewska 2011). Żużel powstały ze spalania śmieci może być wykorzystany jako kruszywo przy budowie dróg. Spalanie odpadów zmniejsza ich objętość o 85-90%, a masę o 65-70% (Baran i Turski 1999).

Spalanie odpadów może dać przy okazji znaczne ilości energii cieplnej i elektrycznej. Trzy duże spalarnie w Paryżu dostarczają energii do ogrzania ponad połowy miasta, dzięki czemu zmniejsza się zużycie węgla. Podobne rozwiązanie problemu gospodarki odpadami jest też wykorzystywane w Szwecji, gdzie w elektrociepłowniach jako paliwa używa się odpadów komunalnych i produkuje się energię elektryczną i ciepłą (Zientek-Varga 2011). Z powodu wysokich kosztów powstania specjalistycznych spalarni istnieje możliwość spalania odpadów wraz z paliwem stałym, głównie węglem. Proces ten jest efektywny i ekonomiczny, z tym że ilość odpadów nie może przekroczyć 20% spalanego węgla. Energetyczne wykorzystanie palnej frakcji odpadów komunalnych może być zachętą do spojrzenia na odpady jako źródło energii odnawialnej. Współspalanie ich z węglem powoduje zmniejszenie zużycia tego paliwa nieodnawialnego, mniejszą ilość składowania odpadów i uzyskanie energii.

W krajach UE już w 1996 roku około 50% odpadów było spalanych (Wielgoński 1998).

W procesie spalania odpadów szczególnie ważne jest, aby zadbać o dokładne oczyszczenie gazów. Jest to konieczne, ponieważ odpady zawierają substancje, które powodują powstawanie szkodliwych składników w spalinach, tj. azotanów, węglowodorów czy pyłów zawierających metale ciężkie (Wilk 2001).

Alternatywnym sposobem spalania odpadów jest przetworzenie ich na paliwo. W różnych krajach są różne sposoby ich powstawania, np. w Norwegii jest to brykietowanie i są różne nazwy takich paliw PAKOM, RDF, BRAM, INBRE, UPAK. Paliwa te są dobrym źródłem energii w energetyce i ciepłownictwie, mogą być przechowywane i spalane z węglem (Baran i Turski 1999). Stosowanie tego rodzaju paliw w procesach współspalania powoduje zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych, które powstają w wyniku spalania paliw kopalnych oraz oszczędność paliw kopalnych (Sobolewski i in. 2007, Rosik-Dulewska 2011).

### **Kompostowanie odpadów komunalnych**

Kompostowanie jest to aerobowa, biotermiczna metoda przeróbki organicznej frakcji odpadów komunalnych. W wyniku tego procesu otrzymuje się nawóz

organiczny o barwie i zapachu ziemi leśnej (Krogulec 1997). Proces ten może być prowadzony w warunkach naturalnych lub bioreaktorach, w różnych technologiach, np. Brikolarre, Herhof, PP (przyspieszonego przymowania), DANO oraz wiele innych (Rosik-Dulewska 2011). Najlepiej jest, gdy kompostowaniu poddawane są frakcje organiczne z odpadów segregowanych (Baran i Turski 1999), jest także możliwość kompostowania odpadów komunalnych niesegregowanych, chociaż jest to mniej korzystne ze względu na skład kompostu (Rosik-Dulewska 2011).

Komposty wyprodukowane z odpadów komunalnych stanowią bogate źródło materii organicznej oraz składników pokarmowych, takich jak: fosfor, potas, azot oraz inne niezbędne roślinom (Sądej i Namiotko 2008). Jak wynika z badań, pierwiastki te są cennym składnikiem kompostów z odpadów (Maćkowiak i Orzechowska 1993, Iglesias-Jimenez i Perez-Garcia 1993, Licznar i in. 1999, Sądej i Namiotko 2009). Materia organiczna zawarta w kompoście ma duże właściwości plonotwórcze i próchnicotwórcze (Mazur i in. 1993) oraz wpływa korzystnie na właściwości fizyczne gleby (Licznar i in. 2000). Głównym problemem w przypadku stosowania tego rodzaju kompostów jest duża zawartość metali ciężkich (Lekan i Kacperek 1990, Rosik-Dulewska 2001, Rutkowska i in. 2003), którą kumulują później w roślinach (Jankowski 1997, Sądej i Namiotko 2008).

Według Whittle i Dysona (2002), pierwiastki te związane są z obecnością w odpadach komunalnych odpadów niebezpiecznych, takich jak baterie, żarówki i in. Także duża zawartość innego rodzaju zanieczyszczeń, tj. szkła, ceramika i czasami uniemożliwia stosowanie kompostu na użytkach rolnych (Rosik-Dulewska 2001).

Zanim zastosuje się kompost z odpadów komunalnych, należy poznać jego skład chemiczny. Komposty bardziej zanieczyszczone mogą być stosowane pod uprawę lasów energetycznych, roślin energetycznych (Baran i Turski 1999), a także do rekultywacji gleb (Flis-Bujak i in. 1995). Na świecie powoli odchodzi się od kompostowania całej masy odpadów komunalnych ze względu na jakość uzyskiwanego kompostu (Rosik-Dulewska 2011). Wielu badaczy zauważyło konieczność segregowania odpadów przed przystąpieniem do procesu kompostowania. Jeżeli kompost powstaje z odpadów segregowanych i jest wolny od zanieczyszczeń, to jest cennym nawozem pod różne uprawy polowe (Baran i Turski 1999).

## **Nowoczesne technologie unieszkodliwiania odpadów komunalnych**

### ***Piroliza***

Piroliza jest to proces degradacji pod wpływem dostatecznie wysokiej temperatury w środowisku beztlenowym. Piroliza może być niskotemperaturowa (450-700°C) lub wysokotemperaturowa (900-1100°C) (Stelmach i Sobolewski 1999).

Piroliza jest procesem korzystniejszym niż spalanie, ponieważ nie powstają toksyczne spaliny, które trzeba oczyszczać (Kozłowska 1998). W czasie procesu pirolizy powstają różne produkty, np. karbonizat, koks, popiół, żużel, smoły, oleje i gazy, na skład których wpływ mają takie czynniki, jak rodzaj odpadu, rodzaj reaktora, rozmiar cząstek, temperatura procesu itp. Gaz powstający i spalający się w czasie opisywanego procesu powoduje powstanie energii cieplnej, która jest wykorzystywana w tym procesie, zaś jej nadmiar może być użyty do celów

grzewczych, a także otrzymania energii elektrycznej. W przypadku pirolizy niskotemperaturowej z 1 kg odpadów komunalnych powstaje 0,6 kg gazu pirolitycznego o wartości opałowej 12 MJ/kg oraz stałej substancji odpadowej o wartości opałowej 5 MJ/kg (Rosik-Dulewska 2011). W różnych badaniach (Pająk 1997, Ledakowicz i in. 1997) stwierdzono, że wartość opałowa gazu wahała się między 11 a 16 MJ/kg. Karbonizat można wykorzystać jako paliwo lub jako dodatek do humusu wykorzystywanego w rekultywowaniu gruntów (Stelmach i Sobolewski 1999). Stelmach i Sobolewski (1999) stwierdzili jednak w swoich badaniach, że w procesie pirolizy powstaje znacznie mniej energii niż w przypadku spalania. Jednak z drugiej strony proces ten daje się łatwiej kontrolować, można w nim utylizować odpady bardziej różnorodnie uzyskując jednorodny produkt, przy mniejszym zużyciu paliwa (Kozłowska 1998).

### **Proces plazmowy**

Plazma jest to silnie zjonizowany gaz, w którym występują neutralne cząsteczki, zjonizowane atomy oraz elektrony, jednak cała objętość zajmowana przez plazmę jest elektrycznie obojętna. Uważa się ją za czwarty stan skupienia materii (Kyc 2008).

Plazmowa utylizacja odpadów polega na wytworzeniu plazmy o temperaturze do 22000°C i rozłożeniu nawet najbardziej szkodliwych i niebezpiecznych związków chemicznych na atomy (Łatak 2001). Proces ten prowadzi do całkowitej destrukcji odpadów przy jednoczesnej minimalizacji szkodliwych gazów. W procesie plazmowym objętość emitowanych gazów jest mniejsza o 10-100 objętości w stosunku do tych, które powstają w konwencjonalnych piecach spalania odpadów (Borkiewicz 2005).

Opisywany proces prowadzi do neutralizacji, likwidacji aktywnych substancji chemicznych i przekształcenie produktów w związki małowcząsteczkowe (Kotowski i Marcjasz-Sięmiątkowska 2003). Wytworzona się gaz palny o wartości opałowej około 12 MJ/m<sup>3</sup> i składzie chemicznym: H<sub>2</sub> (52%), CO (35%), CO<sub>2</sub> (6%), CH<sub>4</sub> (2%), inne gazy (5%) (Kyc 2008). Powstające w tym procesie dwutlenek węgla, wodór i metan mogą być wykorzystane do celów energetycznych i petrochemicznych np. do produkcji metanolu (Borkiewicz 2005). Z każdej tony odpadów utylizowanych w zakładzie w Ottawie produkuje się średnio 1400 kWh energii elektrycznej (Kyc 2008). Produkt utylizacji poprzez plazmę powoduje znaczne zmniejszenie unieszkodliwianych odpadów o ponad 99% (Łatak 2001, Kotowski i Marcjasz-Sięmiątkowska 2003).

### **Podsumowanie**

W teorii istnieje wiele możliwości zagospodarowania odpadów komunalnych w sposób bezpieczny dla środowiska i z korzyścią dla człowieka. Jednak, jak widać w praktyce, gospodarka odpadami stanowi poważny problem. Szczególnie w krajach biedniejszych istotną barierę stanowią wysokie koszty związane z utylizacją odpadów, a także nastawienie i postawy ludzi.

Obecnie, zwłaszcza państwa Unii Europejskiej starają się poprawić sytuację związaną z nagminnym zaśmiecaniem świata. Władze zabiegają szczególnie o przejście z myślenia konsumpcyjnego do recyklingu związanego z ponownym wykorzystaniem odpadów lub też odzyskiem składników użytecznych zawartych w odpadach. W następnej kolejności jest utylizacja odpadów z odzyskiem energii,



a dopiero na końcu składowanie jako ostateczny i najgorszy sposób ich zagospodarowania (Bajorek i in. 2009).

### Bibliografia

- Alwaeli M. 2007a. Efektywności ekonomiczne recyklingu odpadów komunalnych. Paliwa z odpadów, 403-408.
- Alwaeli M. 2007b. Recykling-charakterystyka zakładu recyklingu oraz minimalizacja kosztów produkcji. Paliwa z odpadów, 409-414.
- Bajorek R., Fijałek Z., Guttman M., Kaim., Kasprzycka-Guttman T., Litwinienko G., Magiel E., Misiewicz I., Myśliński A., Parosa R., Skupińska J., Skupińska K., Wilczura-Wachnik H. 2009. Odpady stałe, ciekłe i gazowe. Zapobieganie, powstawanie, utylizacja. Warszawa.
- Baran S., Turska R. 1999. Wybrane zagadnienia z utylizacji i unieszkodliwiania odpadów. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie.
- Beigl P. 2005. Prognozowanie zmian ilości i składu odpadów komunalnych. Mat. VI Międzynarodowego Forum Gospodarki Odpadami. Poznań–Licheń Stary.
- Błaszczak-Pasteczka A., Żukowski W. 2007. Energetyczne wykorzystanie biogazu. Czasopismo Techniczne Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1, 11-17.
- Borkiewicz J. 2005. Plazmowa destrukcja. Ekoprofit, 3, 7-11.
- Dyrektywa Rady z 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów.
- Fischer T., Krieg A. 2001. Projektowanie i budowa biogazowni. Materiały Międzynarodowej Konferencji Odnawialne źródła energii u progu XXI wieku. Warszawa.
- Flis-Bujak M., Baran S., Turski R., Martyn W., Kwiecień J. 1995. Rekultywacja zdewastowanej gleby lekkiej przy wykorzystaniu nawozów niekonwencjonalnych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 418, 617-622.
- Iglesias-Jimenez E., Perez-Garcia V. 1993. City refuse compost as a phosphorus source to overcome the P-fixation capacity of sesquioxide rich soils. Plant and Soil, 148, 115-127.
- Jagięło E. 2003. Metale ciężkie w wodach powierzchniowych w pobliżu składowiska odpadów komunalnych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 492, 101-108.
- Jankowski K. 1997. Możliwość wykorzystania kompostu Dano z odpadów miejskich do nawożenia użytków zielonych. Rozprawy WSRP Siedlce, 48, 1-63.
- Karpińska A. 2011. Społeczeństwo recyklingu – według ramowej dyrektywy o odpadach. Logistyka odzysku, 1, 64-67.
- Kotowski W., Marcjasz-Sięmiątkowska I. 2003. Wytwarzanie gazów palnych i syntezowanych przez utylizację odpadów w płazmie. Gospodarka Paliwami i Energią, 2, 18-22.
- Korzeń Z. 2001. Ekologistyka. Instytut Logistyki i Magazynowania. Poznań.
- Kozłowska B. 1998. Dlaczego piroliza? Termiczna utylizacja odpadów. Jubileuszowa Konferencja Naukowo-Techniczna, 85-94.
- Krogulec N. 1997. Kompostowanie odpadów. Gospodarka odpadami, 5, 35-37.
- Kyć K. 2008. Analiza metod energetycznego wykorzystania odpadów. Materiał Krakowskiej Konferencji Młodych Uczonych, 3, 113-120.
- Ledakowicz S., Stolarek P., Marcinkowski A. 1997. Piroliza frakcji organicznej odpadów komunalnych. III Międzynarodowa Konferencja nt. Spalanie odpadów – technologie i problemy. Szczyrk.

- Lekan C., Kacperek K. 1990. Ocena wartości nawozowej kompostu z odpadów miejskich („DONO”) w doświadczeniu nawozowym. *Pamiętnik Puławski*, 97, 187-200.
- Licznar M., Drozd J., Jamroz E., Liczner S. E., Weber J. 1999. Przemiany makro- i mikroskładników w procesie dojrzewania kompostów produkowanych z odpadów miejskich w warunkach kontrolowanych. *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis*, 200, 201-205.
- Licznar M., Weber J., Drozd J., Liczner S. E., Jamroz E. 2000. Właściwości fizyczne gleby piaszczystej nawożonej kompostami z odpadów miejskich – pierwszy rok po nawożeniu. *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis*, 211, 223-228.
- Łatak J. M. 2001. Plazmowy utylizator rozwiązuje problem odpadów. *Gospodarka Paliwami i Energią*, 11, 26-27.
- Maćkowiak C., Orzechowska K. 1993. Produkcja skład chemiczny oraz wartość nawozowa kompostu produkowanego z odpadów miejskich w ciągu technologicznym „DANO”. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 409, 21-33.
- Malinowski M., Krakowiak-Bal A., Sikora J., Woźniak A. 2009. Ilości generowanych odpadów komunalnych w aspekcie typów gospodarczych gmin województwa małopolskiego. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 9, 23-25.
- Meller E., Figaszewska A., Fluda M., Janczewski A., Perwensis K. 2009. Skład morfologiczny odpadów komunalnych wytwarzanych w Szczecinie i Policach. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 535, 291-296.
- Michalcewicz W., Nowak A. 2000. Występowanie promieniowców w powietrzu wokół składowiska odpadów komunalnych w Podańsku. *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis*, 83, 93-98.
- Mineew M. V., Debreczeni B. 1993. Nawożenie w rolnictwie biologicznym. *Wydawnictwo ART. Olsztyn*, 26-35.
- Mocek A., Owczarzak W. 2001. Wpływ składowiska odpadów w Czmoniu na przyлегłe grunty uprawne. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 477, 421-430.
- Niewiadomski A., Tołoczko W. 2005. Charakterystyka stanu środowiska glebowego w strefie oddziaływania wysypiska odpadów komunalnych w zgniłym błocie. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 505, 273-279.
- Pająk T. 1997. Quasi-pirolityczne technologie spalania odpadów komunalnych. *Materiały konferencyjne I Międzynarodowej Konferencji Paliwa z odpadów. Ustroń*.
- Radlak M. 2008. Recykling, czy składowiska. *Przyroda Polska* 6, 28-29.
- Rocznik Statystyczny Ochrona Środowiska 2012.
- Rosik-Dulewska C. 2001. Zawartość składników nawozowych oraz metali ciężkich i ich frakcji w kompostach z odpadów komunalnych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 477. 467-478.
- Rosik-Dulewska C. 2011. *Podstawy Gospodarki Odpadami*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa, 12-38.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z 29 maja 2012 r. w sprawie poziomów recyklingu, przygotowania do ponownego użycia i odzysku innymi metodami niektórych frakcji odpadów komunalnych.

- Rutkowska B., Ożarowski G., Łabętowicz J., Szulc W. 2003. Ocena zagrożeń dla środowiska glebowego wynikających z wnoszenia metali ciężkich w kompoście ze śmieci miejskich „Dano”. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 493, 839-845.
- Sądej W., Namiotko A. 2008. Wpływ kompostu z odpadów komunalnych na zawartość kadmu w roślinach. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 533, 319-328.
- Sądej W., Namiotko A. 2009. Formy fosforu w kompostach wytwarzanych ze stałych odpadów miejskich. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 535, 337-379.
- Skolimowski K. 2005. Właściwości technologiczne odpadów komunalnych w Warszawie. Mat. VI Międz. Forum Gospodarki Odpadami, Poznań-Licheń Stary.
- Sobolewski A., Wasilewski R., Stelmach S. 2007. Stałe paliwa wtórne dla energetyki. Paliwa z odpadów VI: 23-28.
- Stelmach S., Sobolewski A. 1999. Pirolyza – alternatywa spalania odpadów komunalnych. Gospodarka Paliwami i Energią, 7, 17-21.
- Szołtysek J. 2009. Logistyka zwrotna. Biblioteka Logistyka. Poznań, 25-35.
- Szymańska-Pulikowska A. 2001. Wpływ sposobu eksploatacji wysypiska odpadów komunalnych na jakość wód podziemnych i powierzchniowych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 477, 487-492.
- Szymańska-Pulikowska A. 2003. Odpady komunalne jako źródło metali ciężkich w środowisku przyrodniczym. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 492, 391-398.
- Uchwała Nr 217 Rady Ministrów z dnia 24 grudnia 2010 r. w sprawie „Krajowego planu gospodarki odpadami 2014”.
- Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r. z późniejszymi zmianami (Dz.U. 01.62.628).
- Ustawa z dnia 11 maja 2001 roku o obowiązkach przedsiębiorców w zakresie gospodarowania niektórymi odpadami oraz o opłacie produktowej i opłacie depozytowej.
- Wilk R. 2001. Podstawy niskoemisyjnego spalania. GNOME-PAN, Katowice, 3-10.
- Whittle A. J., Dyson A. J. 2002. The fate of heavy metals in green waste composting. The Environmentalist, 22, 13-21.
- Zientek-Varga J. 2011. Co robić ze śmieciami? Może podpowiedzą nam sąsiedzi. Przyroda Polska, 7, 26-27.
- Żuchowski J., Ratuszyński M. 2003. Problemy techniczno-ekonomiczne pozyskiwania paliwa biogazowego na składowisku odpadów komunalnych w Radomiu. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej, 10, 6-8.