



**Potencjał wykorzystania
biotechnologii
w zarządzaniu odpadami w Polsce**

Warszawa, grudzień 2019 r.

Autor: Dorota Anna Andrzejewska-Górecka, Ewa Duchnowska, Agnieszka Poniatowska

Współpraca: Janusz Chojna

Redakcja: Jakub Nowak, Małgorzata Wieteska

Projekt graficzny: Anna Olczak

Współpraca graficzna: Liliana Gałązka, Tomasz Gałązka, Sebastian Grzybowski

Polski Instytut Ekonomiczny

Al. Jerozolimskie 87

02-001 Warszawa

© Copyright by Polski Instytut Ekonomiczny

ISBN 978-83-66306-46-2

Spis treści

Kluczowe wnioski	4
Kluczowe liczby	6
Wprowadzenie	7
Cel UE: przekształcenie odpadów w zasoby	8
Polskie priorytety	14
Krajowa gospodarka odpadami	17
Rola biotechnologii w zagospodarowaniu odpadów w Polsce ..	20
Rekomendacje	29
Słownik terminów związanych z gospodarką odpadami	30
Spis ramek, rysunków, tabel i wykresów	31
Bibliografia	32

Kluczowe wnioski

- **W ostatnich latach w Polsce nastąpiły bardzo korzystne zmiany w zakresie wytwarzania i gospodarowania odpadami komunalnymi** polegające na ograniczeniu ich ilości, zwiększeniu masy odpadów przetwarzanych oraz poprawie struktury ich zagospodarowania. Jednak mimo szybszego niż przeciętne w UE tempa spadku ilości odpadów komunalnych składowanych i wzrostu ilości odpadów poddawanych recyklingowi, w tym biologicznemu, nadal uzyskujemy w tym obszarze wyniki gorsze od średniej unijnej. Zwraca zwłaszcza uwagę bardzo wysoki udział odpadów składowanych i relatywnie mały udział odpadów poddawanych recyklingowi biologicznemu – kompostowaniu lub fermentacji. W Polsce zbyt mało odzyskuje się też odpadów przemysłowych będących cennym źródłem surowców, w tym minerałów ziem rzadkich, zbyt niskie jest również wykorzystanie odpadów komunalnych i przemysłowych jako źródła energii przy respektowaniu właściwej hierarchii postępowania z odpadami przez zakłady przemysłowe.
- **Głównym źródłem odpadów w Polsce jest przemysł. W 2016 r. wytworzył on 78,7 proc. odpadów, znacznie więcej niż przeciętnie w UE-28 (48,7 proc.).** Przyczyną jest stosunkowo wysoki udział sektora przemysłowego w gospodarce Polski⁴. Największym „winowajcą” jest sektor górniczy i wydobywczy odpowiedzialny za 38,8 proc. odpadów (w UE-28 za 25,3 proc.), relatywnie dużo odpadów generuje też przemysł przetwórczy (16,5 proc. wobec 10,3 proc. w UE-28). Mniejsze znaczenie niż w UE ma natomiast budownictwo (10,4 proc. w Polsce i 36,4 proc. w UE), dość niski jest też udział gospodarstw domowych (5,2 proc. wobec 8,5 proc. w UE-28).
- **Przed Unią Europejską rewolucja w gospodarce odpadami.** Wszystkie kraje członkowskie stoją przed przejściem od modelu gospodarki linearnej, opartej na pobieraniu ze środowiska surowców, wytwarzaniu w dużych ilościach słabej jakości produktów i generowaniu odpadów (model „weź, wytwórz, zużyj i wyrzuć”) do gospodarki o obiegu zamkniętym – GOZ (model „weź, wytwórz, zużyj, weź, wytwórz, zużyj ponownie”). Przejście do nowego modelu, w którym odpady, jeżeli powstają, są traktowane jako surowce, przyniesie wiele korzyści o charakterze środowiskowym, społecznym i gospodarczym. Dzięki temu znacznie zwiększy się efektywność wykorzystania zasobów naturalnych i zostanie ograniczony negatywny wpływ odpadów na środowisko. Przejście do GOZ nie jest ani łatwe, ani tanie. Wymaga zaangażowania polityków, przedsiębiorców i gospodarstw domowych, a także zwiększenia nakładów na inwestycje, badania naukowe i innowacje, w tym biotechnologiczne.
- **Ważnym obszarem GOZ ma być biogospodarka, która wykorzystuje w szerokim zakresie biotechnologię.** Obejmuje produkcję odnawialnych zasobów biologicznych oraz przekształcanie tych zasobów i strumieni odpadów w produkty o wyższej wartości dodanej: żywność, pasze,

⁴ Według danych Eurostatu w 2017 r. udział przemysłu w wartości dodanej brutto wyniósł w Polsce 25,4 proc. wobec 19,6 proc. w UE-28 ogółem.

bioprodukty i bioenergię. W najbliższych latach w centrum uwagi UE będzie ograniczanie zużycia tworzyw sztucznych i ich zastępowanie tworzywami nadającymi się do powtórnego użycia lub recyklingu. Istotne znaczenie będzie miało zwłaszcza zastępowanie biodegradowalnymi tworzywami produkowanymi, m.in. z odpadów organicznych.

- **Polska polityka w zakresie odpadów jest zbieżna z polityką UE.** Jej celem długookresowym jest – podobnie jak w Unii – przejście do gospodarki o obiegu zamkniętym, lecz z uwzględnieniem polskiej specyfiki. W Polsce większą wagę niż w UE przywiązuje się do zagospodarowania odpadów przemysłowych, co wynika z relatywnie dużego znaczenia sektora przemysłowego w naszym kraju. Proponowane działania mają spowodować, że odpady, które obecnie w Polsce są balastem, w przyszłości staną się cennym surowcem.
- **Znaczne możliwości dla właściwego zagospodarowania odpadów w Polsce stwarza zastosowanie metod biotechnologicznych.** Są one przydatne zwłaszcza w zagospodarowaniu odpadów organicznych. Dzięki wykorzystaniu biotechnologii możliwe jest przekształcanie takich odpadów m.in. w bioprodukty, a także odzyskiwanie (w mało inwazyjny sposób) metali i usuwanie ze środowiska zanieczyszczeń. Dzięki zastosowaniu metod biotechnologicznych, np. bioługowania, kompostowania, fermentacji metanowej można przetworzyć co najmniej 13 mln t odpadów (w 2016 r. było to 7 proc. wytworzonych odpadów ogółem), w tym 100 proc. odpadów biodegradowalnych.
- **Perspektywicznym kierunkiem wykorzystania biotechnologii w gospodarce**

odpadami jest zwłaszcza fermentacja metanowa, w wyniku której otrzymuje się biogaz. W Polsce istnieje duże zapotrzebowanie na instalacje wykorzystujące tę technologię, w których można przetwarzać wydzielone u źródła odpady organiczne komunalne z odpadami organicznymi z przemysłu.

- **Ważnym obszarem wykorzystania odpadów organicznych może być też wytwarzanie biopolimerów,** z których m.in. powstają biotworzywa, mogące zastępować tworzywa sztuczne. Wiele z nich jest w pełni biodegradowalnych. Duży jest także potencjał biotechnologii w zakresie odzyskiwania surowców i pierwiastków z odpadów przemysłowych, które mogą być wykorzystane w procesach produkcyjnych.
- **Należy podjąć działania służące wykorzystaniu potencjału biotechnologii w zagospodarowaniu odpadów w Polsce.** Można to osiągnąć poprzez: wprowadzenie rozwiązań prawnych i organizacyjnych ułatwiających firmom przetwarzającym odpady organiczne uzyskiwanie pozwolenia na wprowadzenie do obrotu produktu jako nawozu, ulgi podatkowe przy stosowaniu nawozów organicznych z bioodpadów.
- **Wprowadzenie instrumentów ekonomicznych,** np. ulg podatkowych, przy stosowaniu nawozów organicznych z bioodpadów, stworzenie systemu wsparcia dla budowy regionalnych suszarni odpadów ściekowych, promowanie i wprowadzenie zachęt ekonomicznych dla wytwarzania tworzyw biodegradowalnych produkowanych m.in. z odpadów organicznych, mogących zastępować tworzywa sztuczne, a także przez finansowanie projektów badawczych, które zwiększą wykorzystanie biotechnologii w gospodarowaniu odpadami w Polsce.

Kluczowe liczby

4,8 tony odpadów rocznie przypada na jednego mieszkańca Polski

78,7 proc. odpadów powstaje w Polsce w przemyśle

315 kg odpadów komunalnych rocznie wytwarza przeciętnie mieszkaniec Polski

60 proc. więcej odpadów komunalnych generuje rocznie Duńczyk niż Polak

43 proc. o tyle spadła ilość odpadów komunalnych kierowanych na składowiska w Polsce w latach 2008-2017

33,8 proc. odpadów komunalnych w Polsce poddawanych jest recyklingowi (w tym organicznemu)

3-krotnie wzrost w Polsce odsetek odpadów komunalnych kierowanych do recyklingu w latach 2008-2017

3 razy wyższy wskaźnik recyklingu odpadów komunalnych jest w Niemczech niż w Polsce

4-krotnie zwiększył się w Polsce udział odpadów komunalnych poddanych biologicznym procesom przetwarzania w latach 2012-2017

13 mln t co najmniej tyle odpadów rocznie można przetworzyć w Polsce metodami biotechnologicznymi

100 proc. odpadów biodegradowalnych można przetworzyć przy wykorzystaniu metod biotechnologicznych

13,5 mld m³ rocznie wynosi potencjał produkcji biogazu w Polsce

Wprowadzenie

Do czołowych wyzwań, w obliczu których świat stoi obecnie, należą te związane z degradacją środowiska naturalnego, nadmierną eksploatacją zasobów naturalnych i ich wyczerpywaniem się oraz zmianami klimatu. Jednym z najważniejszych jest zbyt intensywne wykorzystanie zasobów naturalnych, czego przyczyną jest wzrost liczby ludności i rozwój gospodarczy. W związku z przewidywanym wzrostem światowej gospodarki oczekuje się, że w latach 2015-2050 zużycie surowców zwiększy się niemal dwukrotnie (Komisja Europejska, 2019).

Działania mające na celu przeciwstawienie się tym zjawiskom są inicjowane i wdrażane na świecie, w tym w krajach UE, od wielu lat. Postęp, chociaż wyraźnie widoczny, jest jednak niedostateczny, mimo że są one prowadzone wielokierunkowo, m.in. przez realizację ambitnych celów programu na rzecz zrównoważonego rozwoju ONZ (Agenda, 2030), a w ostatnich latach również stymulowanie rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym i biogospodarki wykorzystującej w sposób zrównoważony zasoby odnawialne.

Przejęcie od modelu gospodarki linearnej, opartej na pobieraniu ze środowiska surowców, wytwarzaniu w dużych ilościach słabej jakości produktów i generowaniu odpadów (model „weź, wytwórz, zużyj i wyrzuć”) do gospodarki o obiegu zamkniętym (model „weź, wytwórz, zużyj, weź, wytwórz, zużyj ponownie”), w którym odpady – jeżeli powstają – są traktowane jako surowce, przyniesie wiele korzyści o charakterze środowiskowym, społecznym i gospodarczym. Taka gospodarka odpadami zapewnia efektywne użytkowanie zasobów natural-

nych i zrównoważony wzrost gospodarczy. Jeżeli natomiast odpady unieszkodliwiamy (np. przez składowanie), to tracimy zawarty w nich potencjał materiałowy czy energetyczny.

Według Banku Światowego w 2050 r. mieszkańcy całego świata będą wytwarzali 3,4 mld t stałych odpadów, o 70 proc. więcej niż w 2016 r. (World Bank, 2018). Będą one wymagały właściwego zagospodarowania. W większym niż dotychczas zakresie może w tym pomóc biotechnologia, zwłaszcza dzięki rozwiązaniom innowacyjnym.

Celem opracowania jest pokazanie aktualnych tendencji w unijnej i krajowej polityce wobec odpadów oraz określenie, w jakim zakresie do jej realizacji może przyczynić się wykorzystanie metod biotechnologicznych.

Pierwszą część pracy poświęcono aktualnym priorytetom polityki odpadowej UE, zwłaszcza związanym z wdrażaniem gospodarki o obiegu zamkniętym, w tym biogospodarki działającej w tym systemie. W drugiej i trzeciej części omówiono kwestie krajowe – politykę odpadową państwa i jej priorytety oraz sytuację w zakresie gospodarowania odpadami. Czwarta część publikacji dotyczy możliwości zastosowania w Polsce metod biotechnologicznych w zagospodarowaniu odpadów. Wskazano w niej główne grupy odpadów, które można poddać procesom biotechnologicznym, a także opisano metody, które już są lub mogą być w tym celu zastosowane.

W rekomendacjach wskazano postulowane kierunki działań o charakterze regulacyjnym i finansowym oraz w zakresie rozwoju technologii, które sprzyjałyby pełniejszemu wykorzystaniu potencjału biotechnologii w gospodarce odpadami w Polsce.

Cel UE: przekształcenie odpadów w zasoby

Polityka odpadowa od dawna zajmuje ważne miejsce w Unii Europejskiej. Świadomość wyczerpujących się zasobów naturalnych, uzależnienia od importu surowców, a także postępującej degradacji środowiska naturalnego sprawia, że obszar ten nie tylko nie traci na znaczeniu, lecz jego ranga w polityce europejskiej rośnie. Najczęściej działania w zakresie ograniczania powstawania odpadów i ich właściwego zagospodarowania były inicjowane w kontekście ochrony środowiska i przeciwdziałania zmianom klimatycznym, natomiast obecnie stały się elementem polityki przemysłowej i surowcowej UE oraz podstawą transformacji unijnej gospodarki w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym, przyczyniając się jednocześnie do realizacji celów zrównoważonego rozwoju zawartych w Agendzie 2030 (Komisja Europejska, 2016)².

W ramach prowadzonej polityki odpadami kraje Unii mają wiele problemów do rozwiązania. Działania podejmowane w ostatniej dekadzie przyniosły pozytywne efekty, jednak nie we

wszystkich krajach członkowskich (ramka 1). W latach 2006-2016 połowa z nich zwiększyła masę wytwarzanych odpadów w przeliczeniu na jednego mieszkańca (wykres 1). Dużym wyzwaniem są odpady komunalne, ze względu na swoje zróżnicowanie, różnorodne źródła pochodzenia i szkodliwość dla środowiska. Obecnie ponad 1/5 odpadów komunalnych w UE nadal jest składowana, a tylko mniej niż połowa poddawana recyklingowi (wykres 2).

Podstawą gospodarki odpadami w UE jest hierarchia określająca następującą kolejność priorytetów postępowania: zapobieganie powstawaniu odpadów, przygotowanie do ponownego użycia, recykling, inny odzysk (np. energii) i w ostateczności unieszkodliwianie (składowanie i spalanie bez odzyskiwania energii)

Priorytety polityki UE odnoszące się do odpadów zdefiniowano w 7. programie działań w zakresie środowiska do roku 2020 (Parlament Europejski i Rada, 2013) przyjętym w 2013 r. Są one oparte na obowiązującej w UE hierarchii postępowania z odpadami. Zaliczono do nich:

- zmniejszenie ilości wytwarzanych odpadów,
- maksymalne wykorzystanie recyklingu i ponownego wykorzystywania odpadów,
- ograniczenie spalania do materiałów nienadających się do recyklingu,
- ograniczenie składowania do odpadów nienadających się do recyklingu.

Priorytety te są nadal aktualne. Ambicje UE w tym obszarze są jednak większe i wychodzą poza ramy dotychczas prowadzonej polityki w zakresie ochrony środowiska, klimatu i zasobów.

² Polityka w zakresie rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym wpisuje się w cele zrównoważonego rozwoju, zwłaszcza nr 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14 i 15.

▾ Ramka 1. Gospodarka odpadami w UE

W 2016 r. kraje UE wytworzyły 2,5 mld t odpadów. W latach 2006-2016, z wyjątkiem 2008 r., ich ilość utrzymywała się na zbliżonym poziomie. W tym okresie masa generowanych odpadów w przeliczeniu na jednego mieszkańca spadła o 3,8 proc. osiągając poziom 5 t. Liderami pod względem ograniczania ilości odpadów na jednego mieszkańca były: Portugalia (spadek o 57 proc.), Irlandia (o 53,7 proc.) i Rumunia (o 45 proc.). Jednocześnie w połowie krajów UE wskaźnik ten wzrósł, zwłaszcza na Cyprze (o 73,9 proc.), w Finlandii (o 63,1 proc.) i na Łotwie (o 54,2 proc.) – wykres 1.

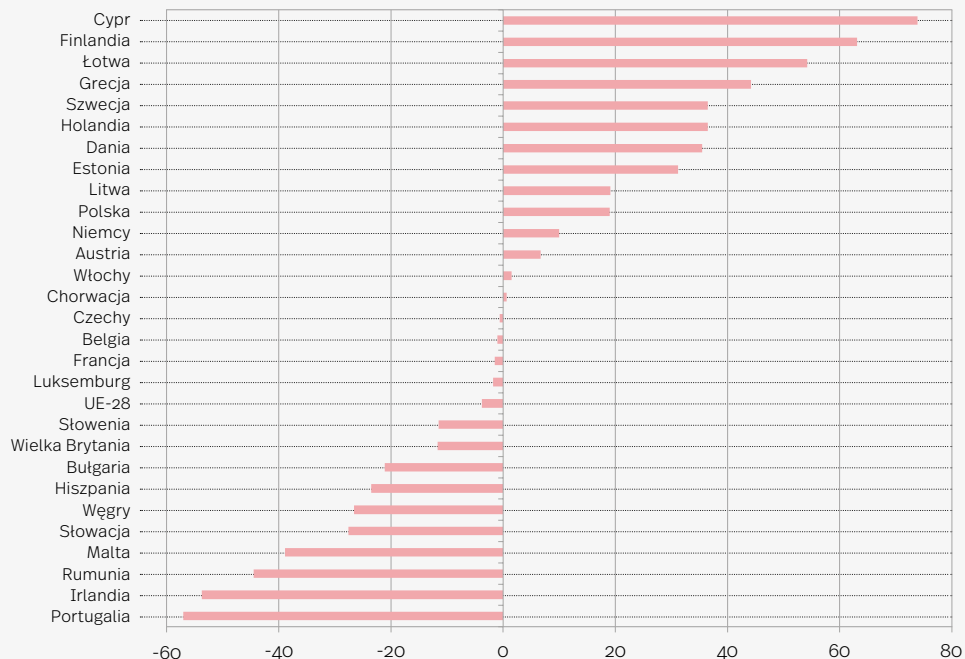
Blisko 2/3 odpadów wytworzyły dwa sektory: budownictwo (36,4 proc.) oraz górnictwo i kopalnictwo (25,3 proc.). Kolejne miejsca zajmowały: przetwórstwo przemysłowe (10,3 proc.), gospodarka odpadami, odzysk surowców (8,9 proc.) oraz gospodarstwa domowe (8,5 proc.).

Bardzo ważną grupą odpadów, chociaż mającą relatywnie niewielki udział w łącznej ich masie (9,8 proc. w 2016 r.), są odpady komunalne, wytwarzane głównie przez gospodarstwa domowe. W 2017 r. mieszkaniec Unii wytwarzał przeciętnie 486 kg tego typu odpadów, o 6,5 proc. mniej niż w 2008 r. Najwięcej odpadów komunalnych na mieszkańca generują kraje zamożne, zwłaszcza Dania (781 kg), Niemcy (633 kg) i Luksemburg (607 kg), a także małe kraje żyjące z turystyki, jak np. Cypr (637 kg) i Malta (604 kg). W latach 2008-2017 ich ilość zwiększyła się w sześciu krajach UE, zwłaszcza na Łotwie (o 27 proc.) i Słowacji (o 21 proc.).

W ostatnich latach w UE nastąpił znaczny postęp w zakresie właściwego zagospodarowania odpadów komunalnych. W 2017 r. w procesie recyklingu materiałów oraz kompostowania/fermentacji zagospodarowano blisko połowę z nich (47 proc.), a 27 proc. spalono z odzyskiem energii. Jednocześnie 24 proc. odpadów składowano. Jeszcze w 2008 r. na składowiska trafiło 40 proc. odpadów, a zaledwie 38 proc. poddano recyklingowi (wykres 2). Taki postęp jest widoczny nie we wszystkich krajach członkowskich. Przykładowo w 2017 r. wskaźnik recyklingu³ wyniósł w Niemczech 67,6 proc., Słowenii 57,8 proc., Austrii 57,7 proc., 16,1 proc. na Cyprze, 13,9 proc. w Rumunii i zaledwie 6,4 proc. na Malcie.

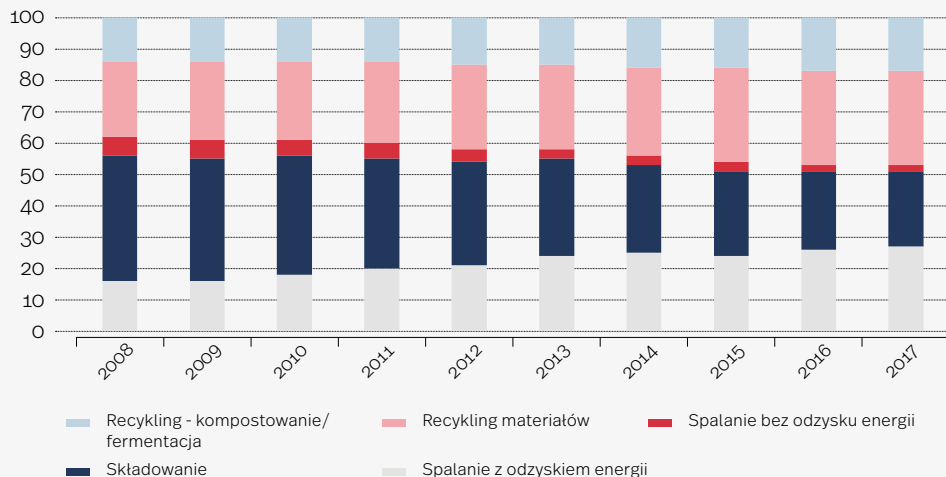
³ Recykling obejmuje recykling materiałowy oraz kompostowanie i fermentację beztlenową.

Wykres 1. Zmiana ilości odpadów wytworzonych w UE-28 na jednego mieszkańca w latach 2006-2016 (w proc.)



Źródło: opracowanie własne PIE na podstawie danych Eurostatu.

Wykres 2. Metody zagospodarowania odpadów komunalnych w UE-28 (udział w proc.)



Źródło: jak w wykresie 1.

Długookresowym celem UE jest transformacja unijnej gospodarki w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym, „gdzie wartość produktów, materiałów i zasobów w gospodarce jest utrzymywana tak długo, jak to możliwe, a wytwarzanie odpadów ograniczone do minimum” (Komisja Europejska, 2015, s. 2)

Polityka taka będzie realizowana w ramach przyjętego przez Komisję Europejską w grudniu 2015 r. pakietu dotyczącego gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ, *circular economy package*)⁴, który zawiera program jej rozwoju obejmujący następujące obszary: produkcja (projektowanie produktów w taki sposób, aby zwiększyć ich trwałość, możliwość naprawy, ponownego wykorzystania i recyklingu), konsumpcja,

gospodarowanie odpadami (zapobieganie powstawaniu odpadów, recykling, odzysk energii i unikanie składowania) i surowce wtórne oraz działania o charakterze horyzontalnym: innowacje i inwestycje. W pakiecie GOZ wskazano pięć obszarów priorytetowych, w których w pierwszej kolejności będą podejmowane działania: tworzywa sztuczne, odpady żywnościowe, surowce krytyczne, odpady rozbiórkowe i budowlane, biomasa i bioprodukty wytworzone z biomasy. Kraje członkowskie zostały zobowiązane do poprawy selektywnej zbiórki odpadów i realizacji nowych, jeszcze bardziej ambitnych ilościowych celów w zakresie recyklingu odpadów komunalnych i opakowaniowych oraz ograniczenia składowania odpadów komunalnych (ramka 2). W celu ich realizacji zapowiedziano udzielenie wsparcia dla nowych inwestycji oraz zwiększenie nakładów na badania i innowacje (Komisja

➤ Ramka 2. Nowe cele dla krajów UE w zakresie gospodarowania odpadami

- recykling 65 proc. odpadów komunalnych do 2035 r. (55 proc. do 2025 r. i 60 proc. do 2030 r.),
- recykling 70 proc. odpadów opakowaniowych do 2030 r.,
- ograniczenie składowania do najwyżej 10 proc. odpadów komunalnych do 2035 r.,
- zakaz składowania odpadów gromadzonych selektywnie,
- wprowadzenie wymogu selektywnego zbierania odpadów niebezpiecznych pochodzących z gospodarstw domowych do 2022 r., bioodpadów do 2023 r., a materiałów włókienniczych do 2025 r. (Komisja Europejska, 2018c).

⁴ Pakiet składa się z komunikatu *Zamknięcie obiegu – plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym* i załącznika zawierającego harmonogram działań oraz czterech wniosków legislacyjnych wprowadzających zmiany w dyrektywach dotyczących odpadów, w szczególności w dyrektywie w sprawie odpadów (2008/98/WE), dyrektywie w sprawie odpadów opakowaniowych (94/62/WE), dyrektywie w sprawie składowania odpadów (1999/31/WE) oraz dyrektywie w sprawie wycofania z eksploatacji pojazdów (2000/53 WE), baterii i akumulatorów (2006/66/WE) oraz zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (2012/19/WE). Państwa członkowskie są zobowiązane do implementacji zmienionych dyrektyw do prawa krajowego do dnia 5 lipca 2020 r.

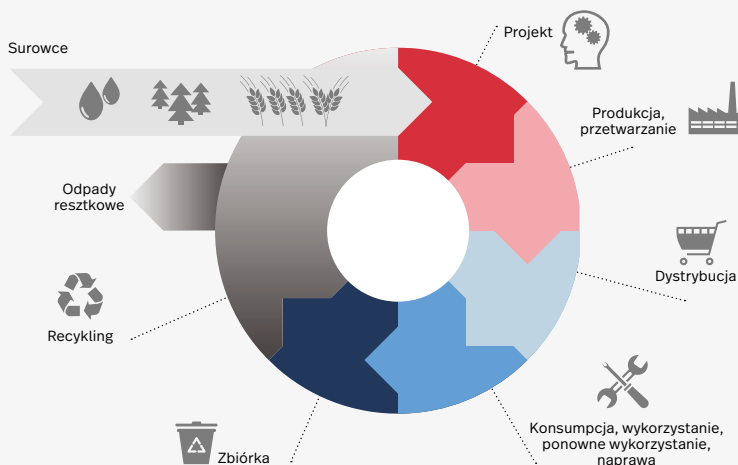
Europejska, 2015). Pierwszym obszarem, którym zajęła się Unia w ramach realizacji programu rozwoju GOZ, jest gospodarka tworzywami sztucznymi. W styczniu 2018 r. przyjęto Europejską strategię na rzecz tworzyw sztucznych w gospodarce o obiegu zamkniętym (Komisja Europejska, 2018a), zgodnie z którą do 2030 r. wszystkie opakowania z tworzyw sztucznych na rynku UE mają nadawać się do ponownego użycia lub do recyklingu, zmniejszy się zużycie tworzyw sztucznych jednorazowego użytku, zostaną też wprowadzone ograniczenia dotyczące celowego stosowania mikrodrobin

plastiku. Promowane będzie wprowadzanie na rynek tworzyw biodegradowalnych. Celem strategii jest również ograniczenie substancji niebezpiecznych w tworzywach sztucznych oraz znaczne zmniejszenie ilości odpadów zalegających w morzach. Komisja Europejska zapowiada wspieranie innowacji w tym zakresie i zwiększenie do 2020 r. o 100 mln euro nakładów na opracowywanie materiałów nadających się w większym stopniu do recyklingu oraz śledzenie i usuwanie substancji niebezpiecznych i zanieczyszczeń z tworzyw sztucznych poddawanych

➤ Ramka 3. Odpady w gospodarce o obiegu zamkniętym i biogospodarce

Gospodarka o obiegu zamkniętym i biogospodarka mają wspólny cel, jakim jest zwiększenie wartości odpadów biologicznych. Jednocześnie oba te modele gospodarki różnią się od siebie. W gospodarce obiegowej chodzi o utrzymanie wartości produktów, materiałów i zasobów, zarówno odnawialnych, jak i nieodnawialnych, tak długo, jak to możliwe przy jednoczesnej minimalizacji wytwarzania odpadów, podczas gdy biogospodarka opiera się jedynie na zasobach odnawialnych i staje się częścią gospodarki o obiegu zamkniętym dopiero wtedy, kiedy spełnia kryteria cyrkularności (rysunek 1).

➤ Rysunek 1. Schemat gospodarki o obiegu zamkniętym



Źródło: <https://pigo.org.pl/?p=4708> [dostęp: 29.06.2019].

recyklingowi. Uzupelnieniem planu działań w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym jest odnowiona strategia dotycząca biogospodarki (Komisja Europejska, 2018b). Jej celem jest opracowywanie i wdrażanie innowacyjnych rozwiązań w sektorze biogospodarki oraz jej przekształcenie w sektor działający w obiegu zamkniętym. Realizacja strategii przyczyni się do zrównoważonego wykorzystania zasobów odnawialnych i przekształcenia odnawialnych surowców i odpadów w bioprodukty. W tym procesie bardzo duże znaczenie będzie miało zastosowanie metod biotechnologicznych. Strategia zakłada m.in. wsparcie działalności badawczej i wdrożeniowej w obszarze biotechnologii (m.in. w zakresie opracowania i wdrożenia nowych biotechnologicznych łańcuchów wartości wykorzystujących zasoby odnawialne, w tym odpady), pomoc finansową (uruchomienie tematycznej platformy inwestycyjnej na rzecz biogospodarki o obiegu zamkniętym), ułatwienia w zakresie rozwoju nowych zrównoważonych biorafinerii, a także zwiększenie nakładów na badania naukowe i innowacje w celu opracowania materiałów, które zastąpią materiały wytwarzane z surowców kopalnych, opartych na zasobach biologicznych, zdolnych do recyklingu i biodegradowalnych w środowisku morskim.

Na priorytetowe traktowanie rozwoju unijnej gospodarki o obiegu zamkniętym, w tym biogospodarki, w najbliższej dekadzie wskazuje również dokument otwierający debatę „W kierunku zrównoważonej Europy 2030” ze stycznia 2019 r. (Komisja Europejska, 2019). W zakresie gospodarki odpadami przewiduje

się wdrożenie przez państwa członkowskie nowych regulacji dotyczących odpadów i ograniczanie ich zużycia. Kluczowe znaczenie ma mieć budowanie GOZ w obszarze tworzyw sztucznych.

Polityka UE ukierunkowana na wdrażanie gospodarki o obiegu zamkniętym, w tym biogospodarki, stwarza realną szansę na rozwój zastosowań metod biotechnologicznych w zagospodarowaniu odpadów

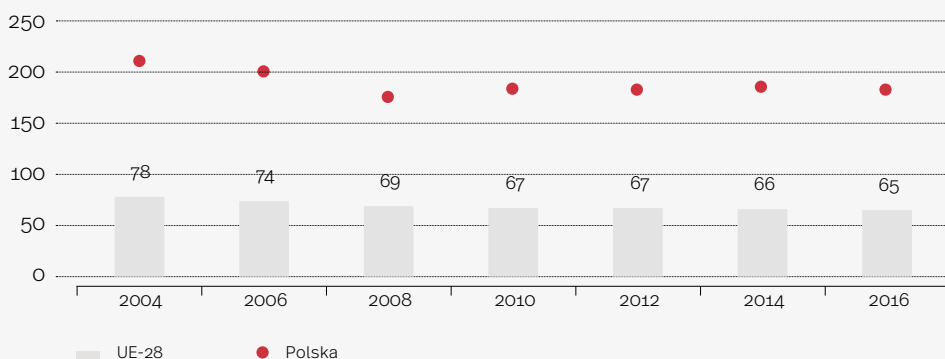
Duże znaczenie w biotechnologii i gospodarce odpadami mają odpady biodegradowalne. Kierunki zagospodarowania i przetwarzania tych odpadów w UE określają dyrektywa w sprawie składowania odpadów, tzw. składowiskowa (Rada Unii Europejskiej, 1999) oraz tzw. dyrektywa odpadowa (Parlament Europejski i Rada, 2008). W dyrektywie składowiskowej wskazano na konieczność zmniejszenia ilości składowanych odpadów biodegradowalnych i selektywne ich zbieranie. Zebrane odpady powinny być poddane recyklingowi i odzyskowi w procesach kompostowania i metanizacji biologicznej. W dyrektywie odpadowej podkreślono konieczność właściwego przetwarzania bioodpadów w celu zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych pochodzących z ich składowania. Jako zalecane działania wymieniono m.in. selektywne zbieranie bioodpadów z zamiarem ich kompostowania i uzyskiwania z nich sfermentowanej biomasy.

Polskie priorytety

Z problemem nieefektywnej gospodarki odpadami polscy decydenci mierzą się od wielu lat. Choć w Polsce ilość wytwarzanych odpadów na jednego mieszkańca jest relatywnie niska (poniżej średniej w UE), to jednak ma tendencję rosnącą. Również pod względem ilości wytworzonych odpadów (z wyłączeniem głównych odpadów mineralnych)

na jednostkę PKB, Polska sytuuje się znacznie powyżej średniej w UE (wykres 3). Korzystne zmiany zachodzą natomiast w przypadku odpadów komunalnych. Polacy wytwarzają ich coraz mniej, poprawia się też struktura ich zagospodarowania. Nadal jednak zbyt dużo odpadów trafia na składowiska, a zbyt mało do recyklingu.

➤ **Wykres 3.** Wytwarzanie odpadów (z wyłączeniem głównych odpadów mineralnych) na jednostkę PKB w Polsce na tle UE-28 (w kg na 1000 euro)



Źródło: jak w wykresie 1.

Polityka Polski w zakresie wytwarzania i zagospodarowania odpadów jest zbieżna z polityką Unii Europejskiej. Główne jej cele określono w kluczowych krajowych dokumentach strategicznych: Strategii na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju (SOR, 2017) i Krajowym Planie Gospodarki Odpadami do 2022 r. (KPGO 2022, 2016).

Do głównych działań w zakresie gospodarowania odpadami przewidzianych w SOR, które mają być realizowane do 2030 r., zaliczono:

→ gospodarowanie odpadami zgodnie z hierarchią sposobów postępowania z odpadami,

→ rozwijanie recyklingu odpadów,
→ dążenie do maksymalizacji wykorzystania odpadów jako surowców.

Ważnym priorytetem Strategii jest wprowadzenie w Polsce gospodarki o obiegu zamkniętym. Jednym ze strategicznych projektów, przewidzianych do realizacji w ramach SOR, jest przygotowanie i wdrożenie Mapy drogowej w zakresie transformacji w kierunku gospodarki o zamkniętym obiegu. Przyjęta przez Radę Ministrów w dniu 10 września 2019 r. Mapa ma zwłaszcza służyć „identyfikacji działań na rzecz zwiększenia wydajności wykorzystania

zasobów i ograniczenia powstawania odpadów przy jednoczesnym zachowaniu warunku wydajności procesów produkcji i konsumpcji” (Ministerstwo Przedsiębiorczości i Technologii, 2018, s. 5-6). **Przewidziane w Mapie działania mają stymulować rozwój GOZ w Polsce, a jednocześnie odzwierciedlać uwarunkowania i specyfikę polskiej gospodarki**⁵. W dokumencie większą uwagę niż na poziomie UE, zwraca się na ograniczenie i optymalne wykorzystanie odpadów przemysłowych. Przykładowo lepszemu zagospodarowaniu wymagają uboczne produkty spalania węgla kamiennego i brunatnego (np. popioły, żużle, pyły) będące źródłem wielu minerałów. W dokumencie zwraca się uwagę na kluczowe znaczenie recyklingu w zagospodarowaniu odpadów komunalnych. Jednym z priorytetów jest rozwój biogospodarki o obiegu zamkniętym bazującej na metodach biotechnologicznych i poprawa zagospodarowania odpadów organicznych będących jednym ze źródeł biomasy. W dokumencie wskazuje się m.in. na konieczność określenia priorytetów w zakresie badań, rozwoju i innowacji (B+R+I) w sektorze biogospodarki, które byłyby uwzględnione w instrumentach wsparcia. Metodą wykorzystującą odpady, która powinna być promowana, jest biorafinacja. Priorytetem będzie również produkcja biopaliw i biogazu. Propozycje dotyczą m.in. przygotowania systemu wsparcia dla budowy regionalnych suszarni osadów ściekowych. Promowane będzie również wykorzystanie biotechnologii m.in. w procesie recyklingu odpadów.

Strategicznym dokumentem o charakterze sektorowym wskazującym kierunki i wytyczne z zakresu gospodarki odpadami w Polsce

jest Krajowy Plan Gospodarki Odpadami (KPGO 2022, 2016). Do głównych celów w zakresie polityki odpadowej zaliczono m.in.: zapobieganie powstawaniu odpadów, zmniejszenie ilości odpadów komunalnych ulegających biodegradacji kierowanych na składowiska, dążenie do zmniejszenia ilości składowanych odpadów, w tym ulegających biodegradacji, osiągnięcie wymaganego poziomu recyklingu i przygotowania do ponownego użycia papieru, metali, tworzyw sztucznych i szkła pochodzących ze strumienia odpadów komunalnych. W Polsce, podobnie jak w całej UE, obowiązuje hierarchia postępowania z odpadami, zgodnie z którą bardzo ważny jest recykling – także organiczny – w tym obróbka beztlenowa odpadów.

„Rozwijanie gospodarki odpadami, będącej elementem gospodarki o obiegu zamkniętym, przyniesie zarówno pozytywny efekt gospodarczy (wzrost innowacyjności w oparciu o dostęp do surowców wtórnych, w tym z hałd antropogenicznych i odzysk energii z odpadów), jak i polepszy jakość życia (likwidacja uciążliwości związanych ze składowaniem odpadów; odzyskiwanie przestrzeni do wtórnego zagospodarowania)” (SOR, 2017, s. 351)

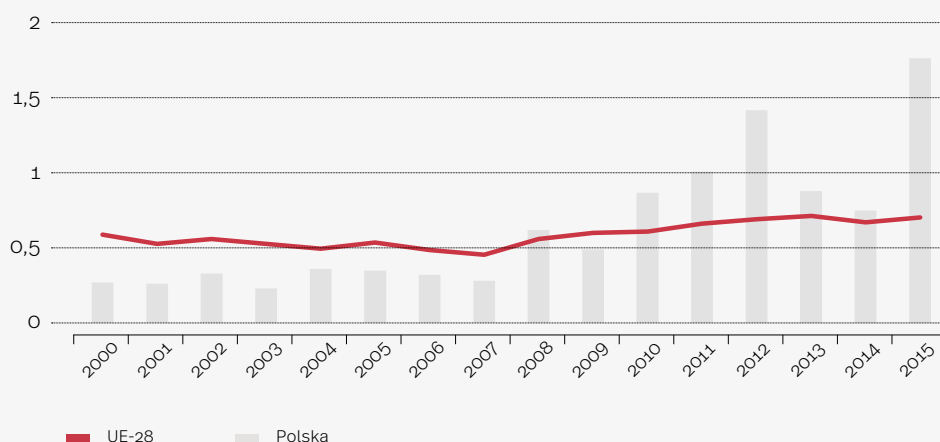
W efektywnym procesie zagospodarowania odpadów duże znaczenie ma wykorzystywanie rozwiązań innowacyjnych, wymaga to jednak

⁵ W zakresie gospodarki odpadami dokument ten jest spójny z zapisami *Polityki ekologicznej państwa 2030 – Strategii rozwoju w obszarze środowiska i gospodarki wodnej* oraz zawartymi w projekcie *Polityki surowcowej państwa*.

pomocy ze strony państwa. Kwestie związane z zagospodarowaniem odpadów, w tym z zastosowaniem biotechnologii, znajdują się na liście **Krajowych Inteligentnych Specjalizacji** (KIS, 2019), priorytetowych obszarów wytypowanych do wsparcia w zakresie prac badawczych, rozwojowych i innowacyjnych (B+R+I). Warto zwrócić uwagę zwłaszcza na KIS 6 Biotechnologiczne procesy i produkty chemii specjalistycznej i inżynierii środowiska i KIS 7 Gospodarka o obiegu zamkniętym (KIS-GOZ). W ramach KIS 6 do priorytetowych obszarów zaliczono m.in.: rozwój procesów biotechnologicznych do wytwarzania innowacyjnych bioproduktów, nowoczesne procesy fermentacyjne do przetwarzania odpadów przemysłu rolno-spożywczego oraz odpadów komunalnych, usuwanie lub odzysk metali z odpadów komunalnych i przemysłowych, rozwój metod biotechnologicznych w dezodoryzacji odpadów. Z kolei w ramach KIS 7 wspiera się prace związane z przechodzeniem polskiej gospodarki na

model GOZ, np. innowacyjne technologie recyklingu odpadów, w tym metodami biologicznymi, technologie odzysku surowców deficytowych i krytycznych z odpadów, technologie odzysku, w tym recyklingu metali z odpadów, technologie przetwarzania odpadów poprodukcyjnych i poeksploatacyjnych, innowacyjne technologie odzysku energetycznego z odpadów. W wytypowanych w ramach KIS obszarach nie tylko jest udzielane wsparcie w zakresie B+R+I, ale też wprowadzane są nowe rozwiązania, w tym systemowe, legislacyjne, organizacyjne, finansowe i edukacyjne. Powyższe działania przyczyniają się do zwiększenia liczby polskich patentów związanych z recyklingiem odpadów i surowcami wtórnymi. W przeliczeniu na 1 mln mieszkańców przewyższyła ona w pierwszej połowie obecnej dekady średnią unijną (wykres 4). W 2015 r. Polska zajmowała pod tym względem – razem z Cyprzem – 4. miejsce w UE, wyprzedzając m.in. Holandię, Niemcy, Szwecję i Austrię.

▼ **Wykres 4.** Liczba patentów związanych z recyklingiem odpadów i surowcami wtórnymi w Polsce i UE-28 (w przeliczeniu na 1 mln mieszkańców)



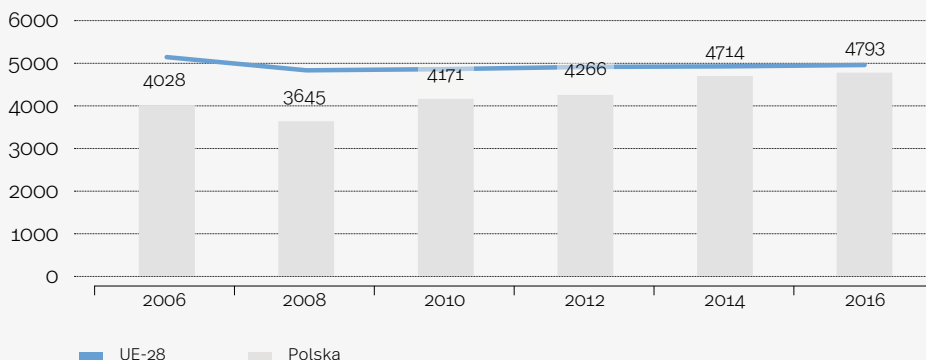
Źródło: jak w wykresie 1.

Krajowa gospodarka odpadami

Według danych Eurostatu w 2016 r. w Polsce wytworzono 182 mln ton odpadów⁶, o 18,5 proc. więcej niż w 2006 r. W przeliczeniu na jednego mieszkańca oznaczało to wzrost z 4,0 do 4,8 tys. kg. Mimo tendencji zwykłej wskaźnik utrzymywał się poniżej średniej

w UE-28 (wykres 5). W 2016 r. pod względem ilości wytworzonych odpadów na mieszkańca Polska zajmowała 14. miejsce w UE. Przed nią, wśród krajów Europy Środkowej i Wschodniej, znalazły się: Estonia, Bułgaria i Rumunia.

» Wykres 5. Ilość odpadów wytwarzanych w Polsce i UE-28 (w kg na mieszkańca)



Źródło: jak w wykresie 1.

Głównym źródłem odpadów jest w Polsce przemysł. W 2016 r. wytworzył on 78,7 proc. odpadów, znacznie więcej niż przeciętnie w UE-28 (48,7 proc.). Przyczyną jest stosunkowo wysoki udział sektora przemysłowego w gospodarce Polski⁷. Największym „winowajcą” jest sektor górniczy i wydobywczy odpowiedzialny za 38,8 proc. odpadów

(w UE-28 za 25,3 proc.), relatywnie dużo odpadów generuje też przemysł przetwórczy (16,5 proc. wobec 10,3 proc. w UE-28). Mniejsze znaczenie niż w UE ma w tym zakresie budownictwo (10,4 proc. w Polsce i 36,4 proc. w UE), dość niski jest też udział gospodarstw domowych (5,2 proc. wobec 8,5 proc. w UE-28).

⁶ Dane GUS dotyczące ilości wytwarzanych w Polsce odpadów różnią się od danych Eurostatu, gdyż obejmują jedynie odpady generowane przez dużych wytwórców, którzy wytwarzają w ciągu roku powyżej 1 tys. ton odpadów lub posiadają 1 mln ton i więcej odpadów nagromadzonych. Rozbieżności występują m.in. w zakresie ilości wytwarzanych odpadów ogółem (GUS, 2018b, s. 140 i 161). Natomiast dane GUS odnoszące się do odpadów komunalnych nie różnią się od danych Eurostatu.

⁷ Według danych Eurostatu w 2017 r. udział przemysłu w wartości dodanej brutto wyniósł w Polsce 25,4 proc. wobec 19,6 proc. w UE-28 ogółem.

W 2017 r. Polak wytworzył o 60 proc. odpadów komunalnych mniej niż Duńczyk i o połowę mniej niż Niemiec

Zarówno w Polsce, jak i w UE-28, gospodarstwa domowe są największym wytwórcą odpadów komunalnych. Z wytworzonych w 2017 r. 12 mln t tego typu odpadów, na jednego mieszkańca w Polsce przypadło 315 kg, o 171 kg mniej niż średnio w UE-28. Dawało to Polsce przedostatnie miejsce w Unii.

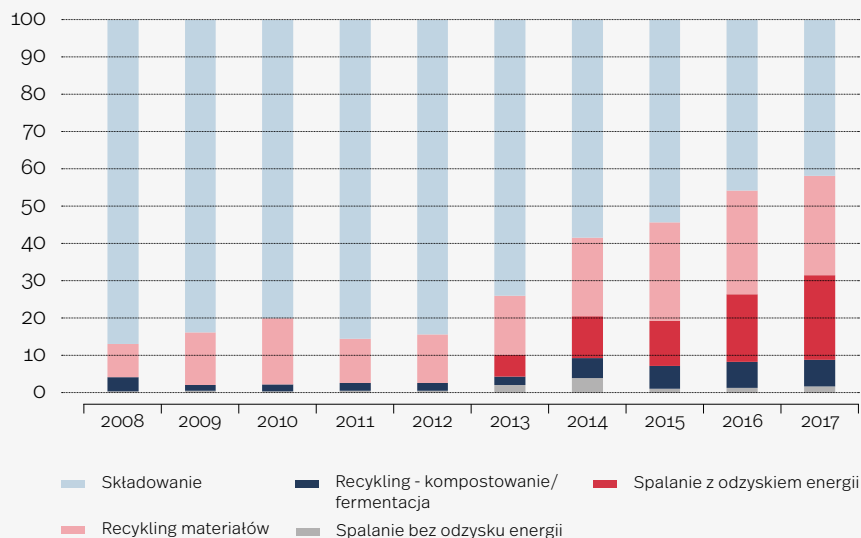
Z ogólnej masy wytworzonych odpadów komunalnych największa ich część została poddana składowaniu (42 proc.), recyklingowi materiałów (27 proc.) oraz przekształceniu termicznemu (spaleniu) z odzyskiem energii (23 proc.). Relatywnie niewielkie znaczenie

miał recykling biologiczny (kompostowanie/fermentacja) – 7 proc.

W ostatnich latach gospodarka odpadami komunalnymi w Polsce uległa bardzo korzystnym zmianom, polegającym na ograniczeniu ich ilości (w porównaniu z 2008 r. o blisko 10 proc.) oraz zwiększeniu ilości przetwarzanych odpadów. Poprawiła się także struktura zagospodarowanych odpadów – wzrost odsetek odpadów podlegających recyklingowi oraz spalaniu z odzyskiem energii przy spadku odsetka odpadów składowanych (wykres 6). Jednak na tle UE-28 nadal nie są to wyniki

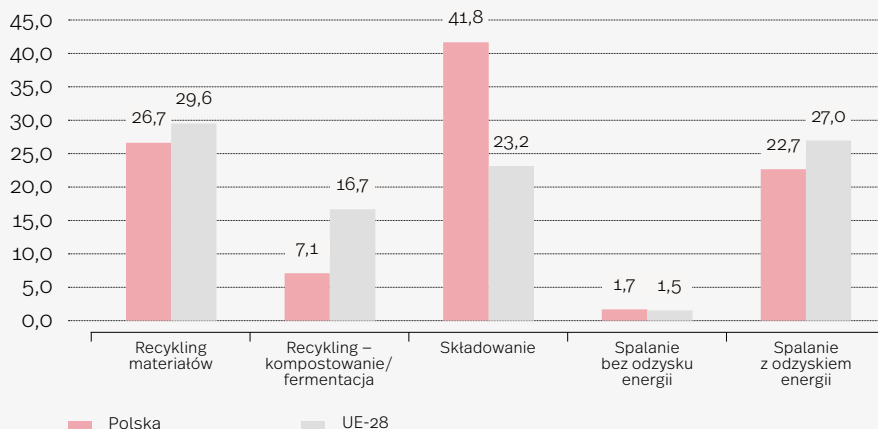
3 razy wyższy wskaźnik recyklingu odpadów komunalnych jest w Niemczech niż w Polsce

Wykres 6. Metody zagospodarowania odpadów komunalnych w Polsce (udział w proc.)



Źródło: jak w wykresie 1.

▸ **Wykres 7. Zagospodarowanie odpadów komunalnych w Polsce na tle UE-28 w 2017 r. (udział w proc.)**



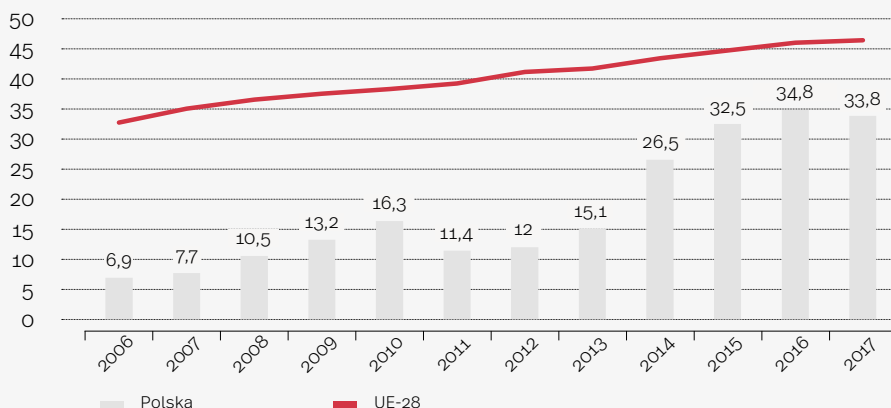
Źródło: jak w wykresie 1.

satysfakcjonujące, uwagę zwraca zwłaszcza bardzo wysoki udział odpadów składowanych i relatywnie mały udział odpadów poddawanych recyklingowi biologicznemu – kompostowaniu lub fermentacji (wykres 7).

W 2017 r. wskaźnik recyklingu odpadów komunalnych wyniósł 33,8 proc. i był niższy od średniego w UE-28 o blisko 13 p.p. Oznacza to, że jego wzrost od 2006 r., kiedy wyniósł

zaledwie 6,9 proc., chociaż imponujący, nadal jest niedostateczny (wykres 8). Powyższe dane wskazują, że poziom recyklingu wyznaczony przez UE na 50 proc. do 2020 r., nie zostanie w Polsce osiągnięty. Aby spełnić rosnące wymagania UE w nadchodzących latach znacznie więcej odpadów powinno być kierowanych do recyklingu (w 2035 r. wskaźnik ten powinien wynieść co najmniej 65 proc.).

▸ **Wykres 8. Wskaźnik recyklingu odpadów komunalnych w Polsce na tle UE-28 (w proc.)**



Źródło: jak w wykresie 1.

Rola biotechnologii w zagospodarowaniu odpadów w Polsce

Biotechnologia – interdyscyplinarna dziedzina nauki i techniki zajmująca się zmianą materii żywej i nieożywionej poprzez wykorzystanie organizmów żywych, ich części, bądź pochodzących od nich produktów, a także modeli procesów biologicznych w celu tworzenia wiedzy, dóbr i usług (OECD, 2009). W biotechnologii wykorzystuje się enzymy, drobnoustroje, hodowle komórek roślinnych i zwierzęcych w procesach produkcji i przy przetwarzaniu chemikaliów i materiałów

Zastosowanie procesów biotechnologicznych w gospodarce odpadami, takich jak: kompostowanie, fermentacja metanowa, oczyszczanie gazów, jest w Polsce powszechnie stosowane od wielu lat. Ponadto wiele ośrodków naukowych i badawczych zajmuje się ich udoskonalaniem.

Dzięki zastosowaniu biologicznych metod przetwarzania odpadów otrzymuje się bioprodukty, można odzyskać w małoinwazyjny sposób zasoby w postaci metali, surowców, a także usunąć ze środowiska zanieczyszczenia np. w postaci substancji ropopochodnych.

ODPADY MOŻLIWE DO PRZETWORZENIA PRZY WYKORZYSTANIU METOD BIOTECHNOLOGICZNYCH

W Polsce przy wykorzystaniu metod biotechnologicznych, takich jak np. bioługowanie metali, kompostowanie, fermentacja metanowa, można przetworzyć co najmniej 13 mln t odpadów rocznie (w 2016 r. było to 7 proc. wytworzonych odpadów ogółem), w tym 100 proc. odpadów biodegradowalnych

Głównymi źródłami odpadów o potencjale biotechnologicznym są w Polsce **odpady wydobywcze**, zwłaszcza z przemysłu metalowego, z uwagi na dużą ich ilość i potencjalną zawartość metali możliwych do odzyskania (tabela 1). W 2013 r. ilość odpadów wytworzonych z fizycznej i chemicznej przeróbki rud metali wynosiła 30,2 mln t (KPGO 2022, 2016).

Drugą grupą odpadów o potencjalnym wykorzystaniu biotechnologicznym są **odpady z procesów termicznych**. Duże znaczenie mają zwłaszcza odpady powstające w hutnictwie żelaza i stali oraz metali nieżelaznych z uwagi na możliwość potencjalnego odzysku zawartych w nich metali. W 2013 r. w tym sektorze w wyniku procesów termicznych powstało

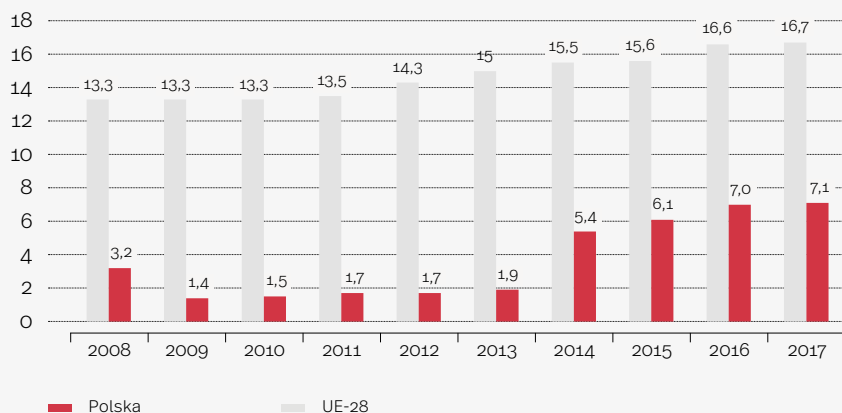
5,5 mln t odpadów, w tym 3,6 mln t stanowiły odpady z hutnictwa żelaza i stali i 1,1 mln t z hutnictwa miedzi. Duża ilość tego rodzaju odpadów jest zgromadzona na składowiskach zakładów produkcyjnych (KPGO 2022, 2016). Przykładowo w latach 2012-2016 producent miedzi KGHM wytworzył ok. 145,1 mln t odpadu wydobywczego. W tym okresie produkcja jednej tony koncentratu miedzi generowała średnio 68,5 t odpadu.

Kolejną grupą o dużym znaczeniu biotechnologicznym są **odpady zawierające części organiczne (komunalne i inne niż komunalne)**. W 2013 r. wytworzono 8,1 mln t odpadów ulegających biodegradacji innych niż komunalne. Były to głównie odpady z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnic-

stwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności (48 proc.), odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury (48 proc.). Pozostałe to odpady z instalacji i urządzeń służących zagospodarowaniu odpadów, z oczyszczalni ścieków oraz z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych. W przypadku odpadów organicznych komunalnych (np. odpady kuchenne, zieleni) w zasadzie jedynym właściwym sposobem ich zagospodarowania jest kompostowanie lub fermentacja beztlenowa.

W 2017 r. do biologicznych procesów przetwarzania (kompostowania lub fermentacji) skierowano 848 tys. t odpadów komunalnych. Ich odsetek jest co prawda o ponad połowę niższy niż przeciętny w UE, jednak w porównaniu z 2012 r. wzrósł czterokrotnie (wykres 9).

➤ **Wykres 9. Udział odpadów komunalnych poddanych biologicznym procesom przetwarzania w Polsce na tle UE-28 (w proc.)**



Źródło: jak w wykresie 1.

Ilość odpadów ulegających biodegradacji przeznaczonych do zagospodarowania, powinna w nadchodzących latach rosnąć z uwagi na wprowadzenie od 2017 r. obowiązku oddzielnego odbierania odpadów biodegradowal-

nych, zwłaszcza bioodpadów z gospodarstw domowych. Problemem może być przetwarzanie żywności, z uwagi na to, że tego rodzaju odpady powinny być poddane procesowi fermentacji, a takich instalacji na razie jest

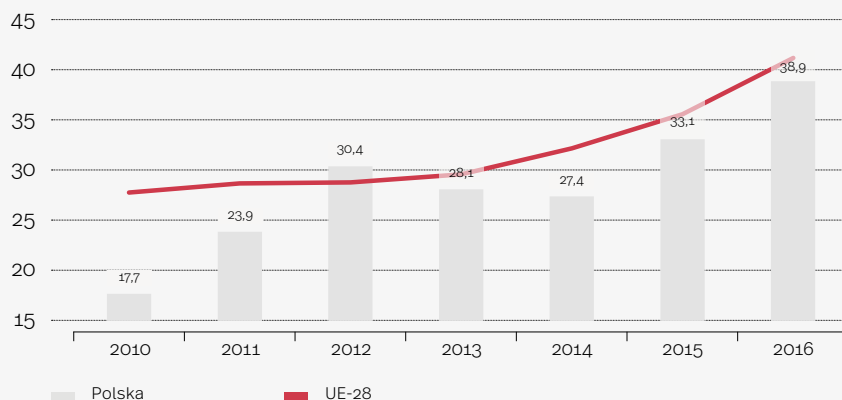
w Polsce bardzo mało. W związku z wprowadzaniem ograniczeń dotyczących składowania odpadów komunalnych ulegających biodegradacji (do 2020 r. ich odsetek ma wynieść maksymalnie 35 proc.) (Ministerstwo Środowiska, 2017), znaczenie zagospodarowania tego typu odpadów w sposób inny niż składowanie będzie rosło, co wiąże się z koniecznością budowy instalacji przetwarzania biologicznego (kompostowania i fermentacji) oraz mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów (Piskowska-Wasiak, 2015).

Kolejną grupą odpadów, wobec której można zastosować metody biotechnologiczne, są odpady zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ZSEE), które stanowią źródło cennych metali. W 2016 r. zebrano ich 232,6 tys. t, w tym 31,7 tys. t stanowił sprzęt informatyczny i telekomunikacyjny (GIOŚ, 2017). Szacuje się, że po 2021 r. zbieranie ZSEE w Polsce, z uwagi

na wymagania UE, powinno kształtować się na poziomie ok. 11 kg/mieszkańca rocznie (Styś, Foks, 2016). W ostatnich latach wskaźnik recyklingu e-odpadów rośnie i w 2016 r. wyniósł 38,9 proc. (wykres 10), nadal jest on jednak niższy od średniego w UE (41,2 proc.).

Najcenniejszą częścią e-odpadów są płytki z obwodem drukowanym (PCB), które stanowią około 3,5 proc. ZSEE. Zawierają one prawie 30 proc. metali, głównie miedź (16 proc.), ale też ołów, cynę, żelazo, nikiel, srebro, platynę i złoto. Ponadto czystość metali szlachetnych w PCB jest ponad 10 razy większa niż pochodzących ze źródeł mineralnych (Karwowska i in., 2014; Woynarowska, Żukowski, 2012). Tradycyjne techniki przetwarzania odpadów elektronicznych często wymagają dużego zużycia energii, są kosztowne i mało wydajne oraz powodują znaczne wtórne zanieczyszczenia środowiska (Xin i in., 2009).

Wykres 10. Wskaźnik recyklingu dla e-odpadów w Polsce i UE-28 (w proc.)



Źródło: jak w wykresie 1.

Metody biotechnologiczne można również wykorzystać w odzysku fosforu z odpadów z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania

chemikaliów fosforowych oraz z chemicznych procesów jego przetworstwa. W 2013 r. w Polsce wytworzono ich 1,5 mln t (KPGO 2022, 2016).

» **Tabela 1.** Odpady możliwe do przetworzenia w procesach biotechnologicznych w Polsce

Rodzaj odpadu	Główne źródła wytwarzania	Ilość odpadów w tys. t /rok	Szacunkowa możliwość zastosowania w proc.	Ilość odpadów do wykorzystania w procesach biotechnologicznych w tys. t/rok	Potencjalny proces biotechnologiczny
Odpady ulegające biodegradacji inne niż komunalne (grupa 02, 03, 19)	Rolnictwo, rybostwó, leśnictwo, łowiectwo, produkcja żywności, drewna i wyrobów z drewna, mebli, papieru i tektury, oczyszczalnie ścieków	8 900	100	8 900	Kompostowanie, fermentacja
Odpady wydobywcze (grupa 01)	Produkcja metali	30 200	10	3 020	Biotugowanie metali
Odpady ulegające biodegradacji komunalne (grupa 20)	Gospodarstwa domowe, biura	800	100	800	Kompostowanie, fermentacja
Odpady z procesów termicznych (grupa 10)	Zwłaszcza hutnictwo żelaza i stali oraz metali nieżelaznych	5 500	10	550	Biotugowanie metali
Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania chemikaliów fosforowych oraz z chemicznych procesów przetwórstwa fosforu (grupa 06, 09)	Produkcja chemikaliów fosforowych	1 533	10	153	Odzyskiwanie fosforu metodami KREPRO, KemiCond, PHOXNAN, AQUA RECI, BioCon, SEPHOS
Zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny (głównie płytki drukowane)	Gospodarstwa domowe, biura, przemysł	9	50	5	Biotugowanie metali
Razem		46 942		13 428	

Źródło: opracowanie własne PIE.

METODY BIOTECHNOLOGICZNE OBECNIE STOSOWANE W GOSPODARCE ODPADAMI

Rozkład substancji organicznych jest zjawiskiem powszechnie występującym w przyrodzie. Proces ten zachodzi z udziałem enzymów wytwarzanych przez różne drobnoustroje (Klimiuk, Łebkowska, 2003). Ta zdolność mikroorganizmów wykorzystywana jest w procesach unieszkodliwiania odpadów i oczyszczania gazów, jednak nie wszystkie

zanieczyszczenia mogą zostać poddane tym procesom, muszą spełniać odpowiednie wymagania pod względem właściwości fizycznych i składu chemicznego (Jędrzak, 2007). Metody biotechnologiczne, takie jak kompostowanie, fermentacja metanowa i oczyszczanie gazów, są powszechnie wykorzystywane w gospodarce odpadami w Polsce i cały czas udoskonalane.

Kompostowanie odpadów biodegradowalnych

Kompostowanie jest metodą unieszkodliwiania zwłaszcza odpadów roślinnych i polega na ich rozkładzie przez mikroorganizmy w warunkach tlenowych. Proces ten prowadzi m.in. do redukcji masy odpadów i zniszczenia patogenów. Produktem końcowym jest głównie kompost, który może być stosowany w rolnictwie jako nawóz organiczny. Zwiększa on zawartość próchnicy w glebie, poprawia jej strukturę, co wpływa na wzrost wydajności upraw (Kulikowska, 2011). Niekiedy proces ten stosuje się również do unieszkodliwiania osadów ściekowych, mułków organicznych, pozostałości po oczyszczaniu zbiorników wodnych, treści pokarmowej zwierząt, mączki paszowej nienadającej się do użytku (Libudzisz, Kowal, Żakowska, 2009).

Fermentacja odpadów biodegradowalnych

Głównym sposobem przetwarzania odpadów komunalnych oraz osadów ściekowych jest fermentacja metanowa, w której w warunkach beztlenowych różne grupy bakterii przekształcają związki organiczne w ditlenek węgla i metan. Zaletą procesu fermentacji jest zmniejszenie objętości odpadów i wytworzenie biogazu, który jest cennym źródłem energii odnawialnej. Biogaz może być pozyskiwany m.in. z fermentacji odpadów znajdujących się na składowiskach, osadów ściekowych, biomasy z upraw energetycznych, odpadów z produkcji roślinnej (GUS, 2018a). Z fermentacji 1 kg odpadów uzyskuje się 0,1-0,73 m³ biogazu. Jego wartość opałowa jest zbliżona do gazu średniokalorycznego i wynosi od 6-7 kWh/m³ (Jędrzak, 2007). Może mieć on podobne zastosowanie jak gaz ziemny (CNG lub LNG) i być wykorzystany do produkcji energii elektrycznej, ciepłej, elektrycznej i ciepłej w jednostkach skojarzonych, dostarczany do sieci gazowej, a także wykorzystywany jako paliwo do silników lub pojazdów oraz w procesach technologicznych (Holewa, Kukulska-Zajac i Pęgielska, 2012; Grzesik, 2006).

Instytut Inżynierii Biosystemów Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu szacuje, że potencjał produkcji biogazu w Polsce wynosi 13,5 mld m³, w tym 7,8 mld m³ biometanu rocznie⁸.

⁸ <https://magazynbiomasa.pl/potencjal-biogazowy-w-polsce-aktualne-dane> [dostęp: 23.06.2019].

Rozwój tego sektora mógłby przyczynić się do zmniejszenia importu gazu ziemnego, stymulować inwestycje na poziomie lokalnym, jednocześnie poprawić stan środowiska naturalnego w kraju przez ograniczenie niekontrolowanego rozkładu odpadów (Dach, Kozłowski, 2018). W Polsce istnieje duże zapotrzebowanie na instalacje fermentacji metanowej, w których można przetwarzać wydzielone u źródła odpady spożywcze/kuchenne razem z innymi odpadami organicznymi z przemysłu.

Według danych Urzędu Regulacji Energii URE w na koniec 2018 r. w Polsce funkcjonowały 303 biogazownie, które wykorzystywały biogaz z oczyszczalni ścieków, składowisk oraz biogaz rolniczy. W 2018 r. miały one moc 237,6 MW, co stanowiło 4 proc. mocy wszystkich instalacji wykorzystujących odnawialne źródła energii (URE, 2019).

Dezodoryzacja gazów

Przetwórstwo odpadów zwierzęcych, ryb, fermy hodowlane, produkcja mączki rybnej, rafinerie, odlewnie żeliwa, zakłady przemysłu celulozowego, włókienniczego, gumowego, tłuszczowego, oczyszczalnie ścieków, składowiska odpadów są źródłami uciążliwych odorów. Biologiczne metody ich oczyszczania są dużo prostsze i tańsze od klasycznych procesów chemicznych i fizycznych, ponadto są to metody praktycznie bezodpadowe (Tabernacka, 2016), a ich efektywność jest wysoka i wynosi 40-100 proc. W związku z tym są dość powszechnie stosowane, w szczególności w instalacjach gospodarki komunalnej (Kita i in., 2013).

Bioremediacja substancji ropopochodnych z gruntów

Bioremediacja jest procesem, w którym dzięki działalności mikroorganizmów i roślin substancje ropopochodne obecne w glebie ulegają całkowitemu rozkładowi lub przekształceniu w formy mniej szkodliwe. Największym zagrożeniem dla środowiska są benzen, toluen, ksylen, fenol, które mają właściwości toksyczne i kancerogenne (Molina i in., 2009). Proces bioremediacji zachodzi naturalnie w przyrodzie, ale trwa zwykle wiele lat (Podsiadło, Krzyśko-Łupicka, 2013). Technologię tę można stosować m.in. w miejscach wycieku ropy naftowej, okolicach zakładów przemysłowych, składowisk odpadów. Proces bioremediacji polega na zaaplikowaniu biopreparatów lub nawozów zawierających składniki odżywcze, które stymulują wzrost mikroorganizmów naturalnie występujących w środowisku (Włóka i in., 2018). Biologiczne oczyszczanie zanieczyszczeń ropopochodnych może się też odbywać z udziałem roślin (tzw. fitodegradacja) (Klimiuk, Łebkowska, 2003). Jest to remediacja stosowana do usuwania powierzchniowego zanieczyszczenia gleby. W procesie tym wykorzystuje się zdolność niektórych roślin do pobierania związków ropopochodnych z gleby, a następnie ich przekształcania w związki mniej szkodliwe. W skali technologicznej proces polega na wysianiu odpowiednich gatunków roślin oraz ewentualnie dostarczeniu im substancji nawozowych (Włóka i in., 2018).

METODY BIOTECHNOLOGICZNE Z POTENCJAŁEM DO WYKORZYSTANIA W GOSPODARCE ODPADAMI

Obecnie wiele ośrodków naukowych w Polsce, jak i za granicą, prowadzi badania w obszarze biotechnologii środowiska. W związku z nasilającym się problemem zanieczyszczenia środowiska, rosnącą ilością odpadów oraz ograniczoną ilością zasobów naturalnych, poszukują nowych, efektywnych i optymalnych technologii.

Usuwanie i odzyskiwanie pierwiastków z różnych odpadów

W naturalnym środowisku metale występują powszechnie i są wykorzystywane w wielu gałęziach przemysłu. Konsekwencją tego jest wywarzanie coraz większej ilości odpadów zawierających metale ciężkie oraz ich emisja do wód i gleby. Stanowi to poważny problem dla środowiska naturalnego. Na liście substancji, które mogą spowodować, że odpady są niebezpieczne⁹, znajdują się m.in. beryl, związki chromu, niklu, miedzi, cynku, arsenu. Wśród nich są też krytyczne surowce mineralne, niezbędne dla rozwoju wysoko zaawansowanych technologii, a jednocześnie rzadko występujące i trudno zastępowalne, takie jak pierwiastki z grupy ziem rzadkich, niob, tantal, gal, german, ind, kobalt i platynowce (Komunikat Komisji Europejskiej do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów w sprawie wykazu surowców krytycznych dla UE, 2017). Ważnym zadaniem dla współczesnej nauki i gospodarki jest poszukiwanie skutecznych, przyjaznych dla środowiska metod uwalniania metali z odpadów oraz ich odzyskiwania.

Bioługowanie metali

Bioługowanie jest to usuwanie metali ze źródeł naturalnych z wykorzystaniem mikroorganizmów. Polega ono na konwersji nierozpuszczalnych metali i ich związków do form rozpuszczalnych w wodzie przy wykorzystaniu mikroorganizmów¹⁰. Badania prowadzone w wielu ośrodkach badawczych na świecie potwierdzają skuteczność bioługowania m.in. w przypadku odpadów komunalnych po termicznym przekształcaniu, odpadów elektronicznych i galwanizerskich (Funari i in., 2018; Ishigaki i in., 2005; Karwowska, 2007; Karwowska i in., 2014). Metoda ta znalazła również zastosowanie do pozyskiwania metali z niskoprocentowych rud także do odzysku złota, miedzi, germanu, galu, uranu oraz i toru w skali przemysłowej (Karwowska, Łebkowska, 2008).

Odzyskiwanie fosforu

Fosfor jest pierwiastkiem biogennym, którego brak uniemożliwia wzrost i rozwój organizmów żywych. Jest on składnikiem nawozów stosowanym w rolnictwie. Według Organizacji Narodów

⁹ W ustawie z 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Ustawa, 2013) wymieniono 50 takich substancji.

¹⁰ <https://www.teraz-srodowisko.pl/sloownik-ochrona-srodowiska/definicja/biolugowanie.html> [dostęp: 15.06.2019].

Zjednoczonych do spraw Wyżywienia i Rolnictwa (FAO) zapotrzebowanie na ten pierwiastek będzie rosło zwłaszcza w krajach rozwijających się, w związku ze zwiększającą się liczbą ludności i rosnącym zapotrzebowaniem oraz wykorzystaniem nawozów. Wzrost popytu na fosfor będzie wynikał również z intensyfikowania produkcji zwierzęcej, a także wytwarzania biopaliw (Klaczyński, 2015). Mimo, że zasoby fosforu na świecie są spore, to przy uwzględnieniu możliwości technicznych i kosztów ich wydobywania wystarczą na 60-70 lat (Wzorek, 2008). W UE rezerwy skał fosforanowych są stosunkowo nieduże i w niewielkim zakresie umożliwiają rozszerzenie zastosowania fosforu poza paszami i nawozami (Komisja Europejska, 2013). W związku z powyższym prowadzi się prace nad technologiami, które umożliwią odzyskanie fosforu z różnych odpadów.

Fosfor występuje m.in. w ściekach i osadach ściekowych, popiołach po termicznym przekształcaniu osadów oraz w pozostałościach po produkcji zwierzęcej, z których może być pozyskiwany metodami biologicznymi. Fosfor z osadów ściekowych może być pozyskiwany bezpośrednio lub z produktów ich termicznego przekształcania, takich jak popioły i żuźle.

W wyniku procesów beztlenowych w oczyszczalniach ścieków powstaje struwit, czyli fosforan amonowo-magnezowy, który może być wykorzystany jako nawóz mineralny, zawiera zbliżone ilości substancji odżywczych do klasycznych nawozów i jest bardzo dobrze przyswajany przez rośliny. Szacuje się, że oczyszczalnie ścieków mogą produkować dzienne 0,5-1,5 tony tego surowca (Klaczyński, 2015).

Biosuszenie odpadów

Biosuszenie jest stosunkowo nowym kierunkiem przetwarzania odpadów komunalnych. Tak jak kompostowanie przebiega w warunkach tlenowych i może być dla niego alternatywą. (Dębicka, Żygadło, Latosińska, 2014). Podstawowym celem tego procesu jest wytworzenie stałego biopaliwa. Biosuszenie jest połączeniem dwóch procesów – biochemicznego i fizycznego. Zastosowanie biosuszenia może zwiększyć nawet trzykrotnie ciepło spalania zmieszanych odpadów komunalnych, które wynosi 3-6,7 MJ/kg (Shao i in., 2010). Takie paliwo może być wykorzystane w piecach cementowych (Bernat, Wojnowska-Baryła, Kasiński, 2011). Efektem biosuszenia jest nie tylko możliwość uzyskania wysokoenergetycznego paliwa, ale również zmniejszenie masy odpadów komunalnych do 35 proc. (Białowiec i in., 2015).

Wytwarzanie biopolimerów

Polimery są głównym składnikiem tworzyw sztucznych, powszechnie stosowanych niemal w każdej dziedzinie życia. Charakteryzują się uniwersalnymi walorami użytkowymi oraz stosunkowo niskimi kosztami produkcji. Większość z nich jest odporna na degradację, co wiąże się z problemem ich akumulacji w środowisku. Szczególnie uciążliwe są materiały opakowaniowe, często jednorazowego użytku, które szybko trafiają na składowiska odpadów (Klimiuk, Pokój, Ciesielski, 2008). Ich recykling jest ograniczony ze względu na zanieczyszczenie resztkami żywności. Znaczną poprawę w obszarze gospodarowania odpadami można osiągnąć przez rozpowszechnianie w różnych gałęziach przemysłu biopolimerów, które mogą być produkowane z surowców odnawialnych i odpadów biologicznych, w przeciwieństwie do tworzyw syntetycznych, które są wytwarzane głównie z produktów rafinacji ropy naftowej. Biopolimery biodegradowalne po wykorzystaniu mogą być przetworzone w procesie kompostowania lub fermentacji (Pokój, 2016).

Popularnym biopolimerem biodegradowalnym jest poliaktyd (PLA) możliwy do uzyskania m.in. z kukurydzy lub odpadów powstających podczas jej przetwarzania. Polihydroksyalkanolany (PHA) są to biopolimery wywarzane przez różne drobnoustroje, także genetycznie zmodyfikowane rośliny (Steinbüchel, 2003; Kaur i in., 2017). Charakteryzują się właściwościami zbliżonymi do polimerów syntetycznych (Mizieleńska, Łopusiewicz, Soból, 2018). Wysokie koszty substratu¹¹ do produkcji PHA (mogą sięgać nawet 50 proc. kosztów ogółem) powodują, że wykorzystuje się tylko te mikroorganizmy, które są zdolne do magazynowania ponad 80 proc. biopolimeru. Dlatego też poszukuje się alternatywnych źródeł pochodzących m.in. z odpadów melasy z buraków, trzciny cukrowej, serwatki (Kaur i in., 2017).



¹¹ Substrat – substancja wyjściowa biorąca udział w reakcji chemicznej.

Rekomendacje

Polska powinna popierać inicjatywy UE dotyczące gospodarowania odpadami organicznymi oraz rozwoju biogospodarki i gospodarki o obiegu zamkniętym. Wspieranym kierunkiem zagospodarowania bioodpadów z przemysłu spożywczego rolniczego, gastronomii i odbieranych od mieszkańców powinna być fermentacja metanowa, w wyniku której otrzymuje się biogaz i kompost (w Polsce istnieje duży potencjał i zapotrzebowanie na instalacje wykorzystujące tę technologię).

Postulujemy podjęcie następujących działań służących wykorzystaniu potencjału biotechnologii w zagospodarowaniu odpadów w Polsce:

- Wprowadzenie rozwiązań prawnych i organizacyjnych ułatwiających firmom przetwarzającym odpady organiczne uzyskiwanie pozwolenia na wprowadzenie do obrotu produktu jako nawozu, zgodnie z wytycznymi UE.
 - Wprowadzenie instrumentów ekonomicznych, np. ulg podatkowych, przy stosowaniu nawozów organicznych z bioodpadów.
 - Zwiększenie wsparcia dla rozwoju technologii OZE wykorzystujących odpady, jak biogazownie czy instalacje produkujące biopaliwa II generacji.
 - Promowanie biorafinacji i produkcji biopaliw z odpadów.
 - Stworzenie systemu wsparcia dla budowy regionalnych suszarni odpadów ściekowych.
 - Promowanie i wprowadzenie zachęt ekonomicznych dla wytwarzania tworzyw biodegradowalnych produkowanych m.in. z odpadów organicznych, mogących zastępować tworzywa sztuczne.
- Należy wspierać przekazywanie środków na realizację projektów (tego zadania mogą się podejmować m.in. NCBiR oraz NCN), których celem będzie opracowanie i upowszechnianie:
- technologii usuwania lub odzysku metali z odpadów komunalnych i przemysłowych,
 - nowoczesnych procesów fermentacyjnych do przetwarzania odpadów przemysłu rolno-spożywczego oraz odpadów komunalnych,
 - metod biotechnologicznych w dezodoryzacji odpadów,
 - innowacyjnych technologii recyklingu odpadów, w tym metodami biologicznymi,
 - możliwości wykorzystania składowisk odpadów jako źródła surowców (tzw. *landfill mining*),
 - metody odzysku fosforu z osadów ściekowych,
 - technologii odzysku surowców deficytowych i krytycznych z odpadów,
 - technologii przetwarzania odpadów poprodukcyjnych i poeksploatacyjnych,
 - innowacyjnych technologii odzysku energetycznego z odpadów,
 - procesów biotechnologicznych do wytwarzania innowacyjnych bioproduktów,
 - materiałów, które zastąpią wytwarzane z surowców kopalnych, będą oparte na zasobach biologicznych oraz będą nadawały się do recyklingu i ulegały biodegradacji.

Słownik terminów związanych z gospodarką odpadami¹²

- **Bioodpady** – ulegające biodegradacji odpady ogrodowe i parkowe, odpady spożywcze i kuchenne z gospodarstw domowych, restauracji, placówek zbiorowego żywienia i handlu detalicznego i porównywalne odpady z zakładów przetwórstwa spożywczego.
- **Gospodarowanie odpadami** – zbieranie, transport, odzysk oraz unieszkodliwienie odpadów, łącznie z nadzorem nad tego rodzaju działaniami, jak również późniejsze postępowanie z miejscami unieszkodliwiania odpadów wraz z działaniami wykonywanymi w charakterze dealera lub brokera.
- **Odpady** – wszelkie substancje lub przedmioty, których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do których pozbycia się został zobowiązany.
- **Odpady komunalne** – odpady powstające w wyniku bytowania człowieka.
- **Odpady przemysłowe** – odpady powstające w wyniku działalności gospodarczej.
- **Odzysk odpadów** – proces, którego głównym wynikiem jest to, aby odpady służyły użytecznemu zastosowaniu, przez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym wypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji lub w wyniku którego odpady są przygotowywane do spełnienia takiej funkcji w danym zakładzie lub w szerszej gospodarce.
- **Ponowne użycie odpadów** – proces, w wyniku którego produkty lub składniki niebędące odpadami są wykorzystywane ponownie do tego samego celu, do którego były przeznaczone.
- **Przetwarzanie odpadów** – procesy odzysku lub unieszkodliwiania, w tym przygotowanie poprzedzające odzysk lub unieszkodliwianie.
- **Przygotowanie odpadów do ponownego użycia** – 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.
- **Recykling** – proces odzysku, w ramach którego materiały odpadowe są ponownie przetwarzane w produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w pierwotnym celu lub innych celach. Obejmuje to również 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.
- **Selektywna zbiórka odpadów** – zbiórka, w ramach której dany strumień odpadów obejmuje odpady jednego rodzaju i o tym samym charakterze w celu ułatwienia specyficznego przetwarzania.
- **Unieszkodliwianie** – proces niebędący odzyskiem, nawet jeżeli wtórnym skutkiem takiego procesu jest odzysk substancji lub energii.

¹² Parlament Europejski i Rada (2008).

Spis ramek, rysunków, tabel i wykresów

➤ Ramka 1. Gospodarka odpadami w UE.....	9
➤ Ramka 2. Nowe cele dla krajów UE w zakresie gospodarowania odpadami.....	11
➤ Ramka 3. Odpady w gospodarce o obiegu zamkniętym i biogospodarce.....	12
➤ Rysunek 1. Schemat gospodarki o obiegu zamkniętym.....	12
➤ Tabela 1. Odpady możliwe do przetworzenia w procesach biotechnologicznych w Polsce.....	23
➤ Wykres 1. Zmiana ilości odpadów wytworzonych w UE-28 na jednego mieszkańca w latach 2006-2016 (w proc.).....	10
➤ Wykres 2. Metody zagospodarowania odpadów komunalnych w UE-28 (udział w proc.).....	10
➤ Wykres 3. Wytwarzanie odpadów (z wyłączeniem głównych odpadów mineralnych) na jednostkę PKB w Polsce na tle UE-28 (w kg na 1000 euro).....	14
➤ Wykres 4. Liczba patentów związanych z recyklingiem odpadów i surowcami wtórnymi w Polsce i UE-28 (w przeliczeniu na 1 mln mieszkańców).....	16
➤ Wykres 5. Ilość odpadów wytwarzanych w Polsce i UE-28 (w kg na mieszkańca).....	17
➤ Wykres 6. Metody zagospodarowania odpadów komunalnych w Polsce (udział w proc.).....	18
➤ Wykres 7. Zagospodarowanie odpadów komunalnych w Polsce na tle UE-28 w 2017 r. (udział w proc.).....	19
➤ Wykres 8. Wskaźnik recyklingu odpadów komunalnych w Polsce na tle UE-28 (w proc.).....	19
➤ Wykres 9. Udział odpadów komunalnych poddanych biologicznym procesom przetwarzania w Polsce na tle UE-28 (w proc.).....	21
➤ Wykres 10. Wskaźnik recyklingu dla e-odpadów w Polsce i UE-28 (w proc.).....	22

Bibliografia

- Bernat, K., Wojnowska-Baryła, I., Kasiński, S. (2011), *Technologie i biotechnologie stosowane w mechaniczno-biologicznym przetwarzaniu odpadów komunalnych*, (w:) Wojnowska-Baryła, I., *Trendy w biotechnologii środowiskowej II*, Wydawnictwo UWM, Olsztyn.
- Białowiec, A. i in. (2015), *Biosuszenie pofermentu z biogazowni rolniczych*, „Rocznik Ochrony Środowiska”, nr 17.
- Dach, J., Kozłowski, K. (2018), *Potencjał rozwoju sektora biogazu w Polsce*, <http://rynekbiogazu.pl/2018/03/21/potencjal-rozwoju-sektora-biogazu-w-polsce/> [dostęp: 5.04.2019].
- Dębicka, M., Żygadło, M., Latosińska, J. (2014), *Badania biosuszenia odpadów komunalnych*, Proceedings of EC Opole, nr 8(1).
- Eurostat Database (2019), <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> [dostęp: 5.04.2019].
- Funari, V. i in., (2018), *Bioleaching of fly ash and bottom ash from Municipal Solid Waste Incineration for metal recovery*, NAXOS2018, 6th International Conference on Sustainable Solid Waste Management, 13-16 June 2018.
- GIOŚ (2017), *Raport o funkcjonowaniu systemu gospodarki zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym w 2016 roku*, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska Warszawa.
- Grzesik, K. (2006), *Wykorzystanie biogazu jako źródła energii, Zielone prądy w edukacji – II edycja*, Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej, Oddział Krakowski, Kraków.
- GUS (2018a), *Energia ze źródeł odnawialnych w 2017 roku*, GUS, Warszawa.
- GUS (2018b), *Ochrona Środowiska 2018*, GUS, Warszawa.
- Holewa, J., Kukulska-Zajęc, E., Pęgielska, M. (2012), *Analiza możliwości wprowadzania biogazu do sieci przesyłowej*, „Nafta-Gaz”, nr 8.
- Ilyas, S., Ruan, C., Bhatti, H.N., Ghauri, M.A., Anwar, M.A. (2009), *Column bioleaching of metals from electronic scrap*, “Hydrometallurgy”, No. 101.
- Ishigaki, T., Nakanishi, A., Tateda, M., Ike, M., Fujita, M. (2005), *Bioleaching of metal from municipal waste incineration fly ash using a mixed culture of sulfur-oxidizing and iron-oxidizing bacteria*, “Chemosphere”, No. 60.
- Jędrzcak, A. (2007), *Biologiczne przetwarzanie odpadów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Karwowska, E. (2007), *Mikrobiologiczne procesy usuwania metali ciężkich ze ścieków i szlamów galwanizerskich. Rozprawa habilitacyjna*, „Prace naukowe. Inżynieria Środowiska”, z. 51, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Karwowska, E. i in. (2014), *Bioleaching of Metals from printed circuit boards supported with surfactant-producing bacteria*, “Journal of Hazardous Materials”, No. 264.
- Karwowska, E., Łebkowska, M. (2008), *Stan badań w Polsce nad wykorzystaniem bakterii do odzysku metali z rud i odpadów*, „Rocznik Ochrony Środowiska”, nr 10.
- Kaur, L. i in. (2017), *Polyhydroxyalkanoates: biosynthesis to commercial production – a review*, Journal of Microbiology, “Biotechnology and Food Sciences”, No. 6(4).
- KIS (2019), *Krajowe Inteligentne Specjalizacje*, Ministerstwo Przedsiębiorczości i Technologii,

- https://www.smart.gov.pl/images/Opisy-KIS_-werja-5_FINAL-DO-MIIR.pdf
[dostęp: 5.04.2019].
- Kita, U. i in. (2013), *Analiza trendów i rozwiązań w zakresie dezodoryzacji gazów metodą biofiltracji. Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska*, t. 3, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Klaczyński, E. (2015), *Fosfor w środowisku, jego znaczenie i możliwości odzysku z osadów ściekowych*, ABC Technologia, listopad/grudzień.
- Klimiuk, E., Łebkowska, M. (2003), *Biotechnologia w ochronie środowiska*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Klimiuk, E., Pokój, T., Ciesielski, S. (2008) *Biotechnologia polihydroksykwasów z udziałem mikroorganizmów – stan obecny i kierunki rozwoju*, (w:) Wojnowska-Baryła, I., *Trendy w biotechnologii środowiskowej*, Wydawnictwo UWM, Olsztyn.
- Komisja Europejska (2013), Komunikat Komisji Europejskiej do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, *Komunikat konsultacyjny w sprawie zrównoważonego stosowania fosforu*, Bruksela.
- Komisja Europejska (2014), *General Union environment action programme to 2020. Living well, within the limits of our planet*, EU, Luxembourg.
- Komisja Europejska (2015), Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-społecznego i Komitetu Regionów: *Zamknięcie obiegu – plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym*, COM(2015) 614 final.
- Komisja Europejska (2016), Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-społecznego i Komitetu Regionów: *Kolejne kroki w kierunku zrównoważonej przyszłości Europy. Europejskie działania na rzecz zrównoważonego rozwoju*, COM(2016) 739 final.
- Komisja Europejska (2017), Komunikat Komisji Europejskiej do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów w sprawie wykazu surowców krytycznych dla UE 2017.
- Komisja Europejska (2018a), Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-społecznego i Komitetu Regionów: *Europejska strategia na rzecz tworzyw sztucznych w gospodarce o obiegu zamkniętym*, COM(2018) 28 final.
- Komisja Europejska (2018b), Komunikat Komisji Europejskiej do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-społecznego i Komitetu Regionów: *Zrównoważona biogospodarka dla Europy: wzmocnienie powiązań między gospodarką, społeczeństwem i środowiskiem*, COM(2018) 673 final.
- Komisja Europejska (2018c), Komunikat prasowy *Gospodarka o obiegu zamkniętym: Dzięki nowym przepisom UE stanie się światowym liderem pod względem gospodarowania odpadami i recyklingu*, 22 maja 2018 r., Bruksela.
- Komisja Europejska (2019), *Dokument otwierający debatę „W kierunku zrównoważonej Europy 2030”*, COM (2019) 22 final
- KPGO 2022 (2016), *Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2022 r.*, MP 2016 poz. 784.
- Kulikowska, D. (2011), *Przemiany materii organicznej w procesie kompostowania oraz wskaźniki dojrzałości kompostu*, (w:) Wojnowska-Baryła, I., *Trendy w biotechnologii środowiskowej II*, Wydawnictwo UWM, Olsztyn.

- Libudzisz, Z., Kowal, K., Żakowska, Z. (2009), *Mikroorganizmy w biotechnologii, ochronie środowiska i produkcji żywności*, (w:) *Mikrobiologia techniczna*, t. 2., Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Ministerstwo Przedsiębiorczości i Technologii (2018), *Projekt Mapy drogowej transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym*, <https://mpit.bip.gov.pl/projekty-zarzadzen-i-uchwal/projekt-mapy-drogowej-transformacji-w-kierunku-gospodarki-o-obiegu-zamknietym-przeslany-na-krm.html> [dostęp: 5.04.2019].
- Ministerstwo Środowiska (2017), *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 15 grudnia 2017 r. w sprawie poziomów ograniczenia składowania masy odpadów komunalnych ulegających biodegradacji* (Dz.U. 2017 poz. 2412).
- Mizielińska, M., Łopusiewicz, Ł., Soból, M. (2018), *Polihydroksyalkanolany – obiecujące polimery biodegradowalne*, „Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych”, nr 2(67).
- Molina, M.C., Gonzalez, N., Bautista, L.F., Sanz, R., Simarro, R., Sanchez, I., Sanz, J.L. (2009), *Isolation and genetic identification of PAH degrading bacteria from a microbial consortium*, “Biodegradation”, nr 20.
- OECD (2009), *Guidelines for a Harmonised Statistical Approach to Biotechnology Research and Development In the Government and Higher Education Sectors*, Paris.
- Parlament Europejski i Rada (2008), *Dyrektywa 2008/98/EC Parlamentu Europejskiego i Rady z 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy*, Dz. U. UE L 312 z 22.11.2008.
- Parlament Europejski i Rada (2013), *Decyzja Parlamentu Europejskiego i Rady nr 1386/2013/UE z dnia 20 listopada 2013 r. w sprawie ogólnego unijnego programu działań w zakresie środowiska do 2020 r. „Dobra jakość życia z uwzględnieniem ograniczeń naszej planety”*, Dz. U. UE L 354/188 z 28.12.2013
- Piskowska-Wasiak, J. (2015), *Pozyskiwanie i uzdatnianie biogazu z kontrolowanej fermentacji biodegradowalnej frakcji odpadów komunalnych*, „Nafta-Gaz”, nr 7.
- Podsiadło, Ł., Krzyško-Łupicka, T. (2013), *Techniki bioremediacji substancji ropopochodnych i metody oceny ich efektywności*, „Inżynieria i Ochrona Środowiska”, nr 4(16).
- Pokój, T. (2016), *Czynniki wpływające na gromadzenie polihydroksykwasów (PHA) przez mieszane kultury mikroorganizmów w systemach z dynamiczną dostępnością substratu (ADF)*, (w:) *Wojnowska-Baryła, I., Trendy w biotechnologii środowiskowej III*, Wydawnictwo UWM, Olsztyn.
- Rada Unii Europejskiej (1999), *Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów*, Dz.U. WE L 182 z 16.07.1999 r.
- Shao, L-M. i in. (2010), *Bio-drying and size sorting of municipal solid waste with high water content for improving energy recovery*, “Waste Management”, No. 30(7).
- SOR (2017), *Strategia na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 r.)*, Ministerstwo Rozwoju, Warszawa.
- Steinbüchel, A. (2003), *Production of rubber-like polymers by microorganisms*, “Current Opinion in Microbiology”, No. 6.
- Styś, T., Foks, R. (2016), *System gospodarowania odpadami opakowaniowymi w Polsce. Perspektywa zamknięcia obiegu*, Instytut Sobieskiego, Warszawa.
- Tabernacka, A. (2016), *Biologiczne oczyszczanie gazów*, (w:) *Łebkowska, M., Załęska-Radziwiłł, M., Mikroorganizmy. Pozytywna i negatywna rola w inżynierii środowiska*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- URE (2019), *Potencjał krajowy OZE w liczbach*, <https://www.ure.gov.pl/pl/oze/potencjal-krajowy-oze> [dostęp: 28.06.2019].
- Ustawa (2013), *Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach* (Dz.U. 2013 poz. 21).

- Wtóra, D., Smol, M., Placek, A., Kacprzak, M. (2018), *Zastosowanie P. arundinacea w fitoremediacji gleb skażonych wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi (WWA) oraz wybranymi herbicydami*, „Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk”, nr 102.
- World Bank (2018), *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*, World Bank, Washington.
- Wojnarowska, A. Żukowski, W. (2012), *Współczesne metody recyklingu odpadów elektronicznych*, „Czasopismo Techniczne. Chemia”, t. R. 109, z. 1-Ch, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, Kraków.
- Wzorek, Z. (2008), *Odzysk związków fosforu z termicznie przetworzonych odpadów i ich zastosowanie jako substytutu naturalnych surowców fosforowych*, seria Inżynieria i Technologia Chemiczna, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, Kraków.
- Xin, B. i in. (2009), *Bioleaching mechanism of Co and Li from spent lithium-ion battery by the mixed culture of acidophilic sulfur-oxidizing and iron-oxidizing bacteria*, “Bioresource Technology”, No. 100.

Źródła internetowe:

- <https://magazynbiomasa.pl/potencjal-biogazowy-w-polsce-aktualne-dane> [dostęp: 23.06.2019].
- <https://www.teraz-srodowisko.pl/sloownik-ochrona-srodowiska/definicja/biolugowanie.html> [dostęp: 23.06.2019].
- <https://pigo.org.pl/?p=4708> [dostęp: 29.06.2019].

Polski Instytut Ekonomiczny

Polski Instytut Ekonomiczny to publiczny *think tank* gospodarczy, którego historia sięga 1928 roku. Obszary badawcze Polskiego Instytutu Ekonomicznego to przede wszystkim handel zagraniczny, makroekonomia, energetyka i gospodarka cyfrowa oraz analizy strategiczne dotyczące kluczowych obszarów życia społecznego i publicznego Polski. Instytut zajmuje się dostarczaniem analiz i ekspertyz do realizacji Strategii na Rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju, a także popularyzacją polskich badań naukowych z zakresu nauk ekonomicznych i społecznych w kraju oraz za granicą.