

Emilia den Boer, Ryszard Szpadt

## Ocena cyklu życia systemu gospodarki odpadami na przykładzie Wrocławia

Nowa dyrektywa ramowa o odpadach [1] wprowadziła wiele zmian w dotychczasowym podejściu do problematyki odpadów, kładąc nacisk na respektowanie nowej hierarchii postępowania z odpadami, w dążeniu do ewolucji społeczeństwa europejskiego w kierunku tzw. społeczeństwa recyklingu. Celem tych dążeń jest wyeliminowanie lub znaczące ograniczenie wytwarzania odpadów oraz ich wykorzystanie, ponieważ gospodarka odpadami jest częścią globalnej gospodarki zasobami materiałów i energii, w tym energii ze źródeł odnawialnych. Jednym z istotnych narzędzi służących do oceny wpływu gospodarki odpadami na środowisko jest ocena cyklu życia – LCA (life cycle assessment), której wyniki mogą być podstawą do odstąpienia od stosowania hierarchii postępowania z odpadami.

Pokazana na rysunku 1 nowa hierarchia postępowania z odpadami wskazuje na priorytety zapobiegania wytwarzaniu odpadów, przygotowania do ponownego ich użycia oraz recyklingu. Inne formy odzyskiwania, w tym energii, umieszczone zostały dopiero na czwartym poziomie hierarchii.



Rys. 1. Hierarchia postępowania z odpadami  
Fig. 1. Hierarchy levels in the handling of waste

Wprowadzenie w dyrektywie ramowej o odpadach nowych pojęć, takich jak produkty uboczne czy utrata statusu odpadów przez niektóre rodzaje odpadów, stwarza większe możliwości odzysku materiałów odpadowych niż dotychczas. Schemat przepływu strumienia odpadów w systemie gospodarki odpadami, obejmujący te nowe pojęcia, przedstawiono na rysunku 2.

Stosując hierarchię postępowania z odpadami należy podejmować środki sprzyjające takim rozwiązaniom, które dają najlepszy całkowity wynik środowiskowy. W przypadku niektórych strumieni odpadów może to oznaczać odstąpienie od tej hierarchii, jeżeli jest to uzasadnione zastosowaniem metodologii cyklu życia, obejmującej całkowite oddziaływanie na środowisko związane z wytwarzaniem i gospodarowaniem tymi odpadami. Należy wziąć pod uwagę ogólne zasady ochrony środowiska dotyczące ostrożności i zrównoważonego podejścia, wykonalności technicznej i opłacalności ekonomicznej, ochrony zasobów, a także całkowitego oddziaływania na środowisko, zdrowie ludzkie, gospodarkę i aspekty społeczne. Podkreśla się potrzebę uwzględnienia oceny cyklu życia w planowaniu i wyborze najlepszego rozwiązania gospodarki odpadami. Ta technika jest jednak bardzo rzadko stosowana w Polsce, mimo stosunkowo łatwej dostępności do odpowiednich narzędzi, tj. programów komputerowych służących do tego celu [2, 3].

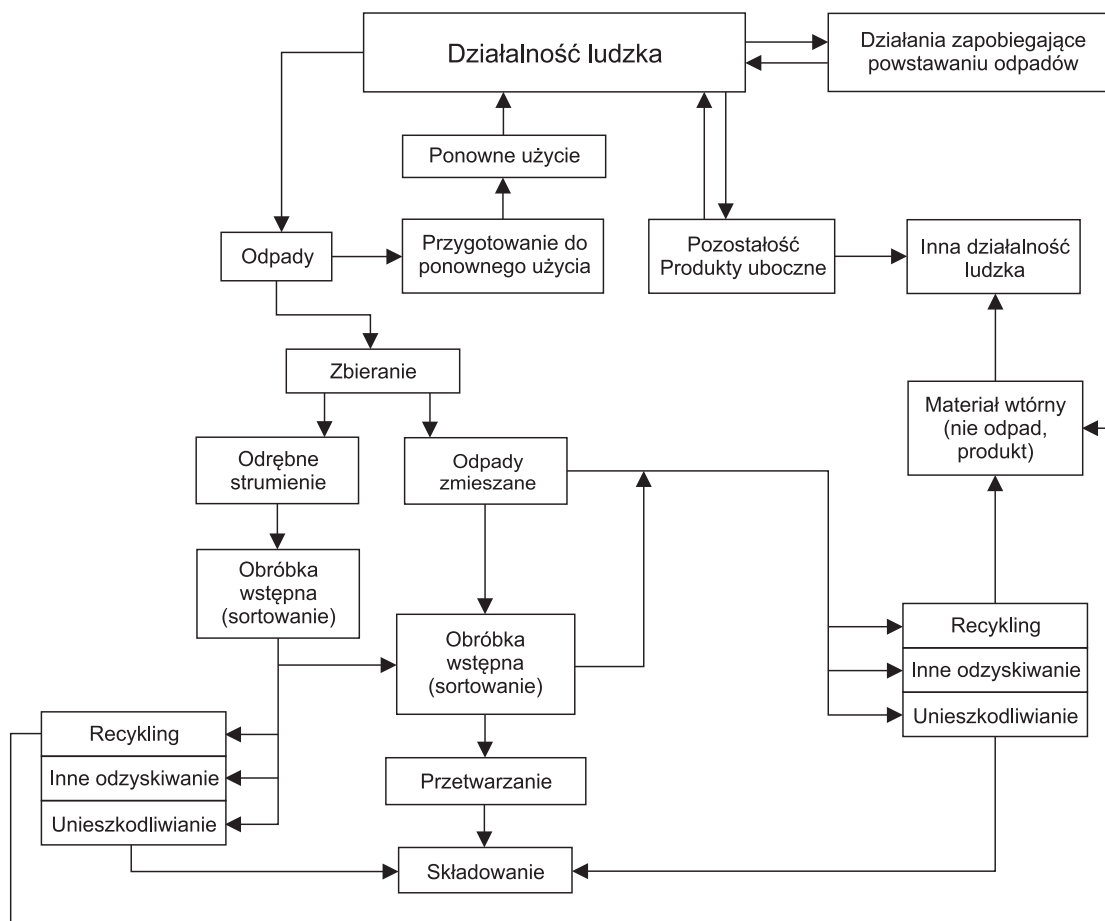
Według definicji podanej przez Komisję Europejską, LCA to proces zbierania i oceny danych wejściowych i wyjściowych wyrobu oraz potencjalnego wpływu na środowisko w całym jego cyklu życia (produkcja, użytkowanie i odzysk/unieszkodliwienie odpadu). Analizując użycie LCA do analizy zintegrowanych systemów gospodarki odpadami widać różne podejścia strategiczne wymagające odmiennych rozwiązań metodologicznych [4]:

- LCA specyficznego produktu (cały cykl życia produktu lub tylko system gospodarki odpadami związanymi z danym produktem); cały cykl życia, jak również przetwarzanie odpadu po użyciu danego produktu są włączone do granic systemu,

- LCA różnych opcji gospodarki odpadami (cykl życia rozpoczyna się wówczas, gdy zużyty produkt jest umieszczony w pojemniku na odpady i kończy się wraz z nieszkodliwieniem odpadu lub jego powrotem do systemu technologicznego (poprzez recykling) w celu zastąpienia innych produktów); granicą systemu jest wprowadzenie odpadów do systemu gospodarki odpadami,

- LCA w celu optymalizacji strategii gospodarki odpadami (w wielu elementach ten przypadek jest podobny do poprzedniego, jednak nacisk jest położony w szczególności na porównanie i ocenę strategii gospodarowania odpadami, np. można włączyć także kwestie zapobiegania wytwarzaniu odpadów, co powoduje rozszerzenie granic systemu).

Analiza cyklu życia była dotychczas stosowana między innymi do oceny oddziaływania składowisk odpadów na środowisko [4–6], do analizy systemów gospodarki odpadami komunalnymi [7–9], osadami ściekowymi [9], odpadami mineralnymi [10, 11] i zużyтыми bateriami [12, 13], a także



Rys. 2. Schemat przepływu strumienia odpadów w systemie gospodarki odpadami  
Fig. 2. Diagram of waste stream flow in the waste management system

w branży budowlanej [14, 15]. Uzupełnieniem środowiskowej oceny cyklu życia produktów jest ocena społeczna cyklu życia [16], jak również ocena kosztów cyklu życia.

W gospodarce odpadami komunalnymi LCA obejmuje etapy od umieszczenia odpadów przez mieszkańców w (zewnętrznym) pojemniku/kontenerze, poprzez odbieranie, przeładunek, transport i ich zagospodarowanie, włączając ostateczne unieszkodliwienie. LCA wymaga przeprowadzenia bilansu materiałowego i energetycznego analizowanego systemu, czyli zarówno danych wejściowych (materiały, energia), jak i wyjściowych (emisje, odpady), co jest pracochłonne, jednak jest warunkiem koniecznym do przeprowadzenia pełnej oceny wpływu na środowisko.

W Polsce dotąd nie był prowadzony szczegółowy monitoring instalacji do zagospodarowania odpadów, dlatego wykorzystywane są dane z podobnych instalacji w innych krajach. Do oceny ekologicznej systemów zarządzania gospodarką odpadami komunalnymi, z wykorzystaniem LCA, zostało opracowanych wiele modeli, które zawierają tego typu dane jednostkowe. Wybrane modele zostały przedstawione w serii publikacji poświęconych tematyce oceny systemów gospodarki odpadami [2].

W niniejszej pracy przedstawiono zasady stosowania oraz wyniki oceny cyklu życia gospodarki odpadami komunalnymi we Wrocławiu. Obliczenia zostały wykonane w modelu aplikacji LCA-IWM [3], pozytywnie zweryfikowanym przez międzynarodowych ekspertów [17]. Ocenie poddano alternatywne warianty gospodarki odpadami komunalnymi we Wrocławiu przewidziane na 2020 r., zgodne z wymogami przepisów unijnych oraz krajowych [18].

## Wariantowe rozwiązania gospodarki odpadami

Bilans ilościowo-jakościowy odpadów – obecny i prognozowany w 2020 r. – na podstawie opracowania [18] przedstawiono w tabeli 1. Zgodnie z dyrektywą ramową w sprawie odpadów [1], do 2020 r. należy poddać przygotowaniu do ponownego wykorzystania i recyklingowi co najmniej 50% masy odpadów papieru, metali, tworzyw sztucznych i szkła pochodzących z gospodarstw domowych oraz możliwie z innych podobnych strumieni odpadów. W tabeli tej uwzględniono także selektywne zbieranie innych odpadów.

Rysunek 3 przedstawia obecne przepływy strumienia odpadów w systemie gospodarki odpadami komunalnymi Wrocławia. W celu uproszczenia analizy uwzględniono jedynie główne frakcje surowców, bioodpady oraz odpady zmieszane, ponieważ mają one największy wpływ na wynik obliczeń. Ocenie poddano trzy warianty gospodarki odpadami w 2020 r., których schematy przedstawiono na rysunkach 4–6. Wszystkie warianty obejmują selektywne zbieranie 50% papieru, metali, tworzyw i szkła, 20% bioodpadów kuchennych i ogrodowych oraz 80% odpadów z terenów zielonych, a ponadto termiczne lub mechaniczno-biologiczne przetwarzanie pozostałych odpadów zmieszanych, w tym:

- wariant I: przetwarzanie mechaniczno-biologiczne z tlenową stabilizacją biofrakcji wydzielonej z odpadów zmieszanych (rys. 4),

- wariant II: przetwarzanie mechaniczno-biologiczne z beztlenową stabilizacją biofrakcji wydzielonej z odpadów zmieszanych (z odzyskiem biogazu) (rys. 5),

- wariant III: spalanie odpadów zmieszanych (rys. 6).

Tabela 1. Obecny i prognozowany w 2020 r. skład odpadów z uwzględnieniem ich selektywnego zbierania

Table 1. Composition of waste, current and predicted in 2020, with consideration of selective collection

Rodzaj odpadów	Odpady wytwarzane obecnie tys. t/a	Odpady wytworzone w 2020 r. tys. t/a	Odpady zebrane selektywnie w 2020 r. tys. t/a
Papier	52,152	62,360	31,180
Szkoło	27,119	29,865	14,933
Metale	7,231	7,170	3,585
Tworzywa	41,513	48,349	24,175
Wielomateriałowe	6,815	7,894	0,789
Kuchenne i ogrodowe	78,367	80,648	16,130
Inertne	8,623	9,209	–
Frakcja <10 mm	11,334	11,578	–
Tekstylia	6 189	6,907	0,691
Drewno	0,695	1,382	–
Niebezpieczne	2,086	2,434	1,217
Inne	8,831	12,432	–
Wielkogabarytowe	7,093	8,026	4,013
Zielone	14,533	16,314	14,683
Suma	272,581	304,568	134,799

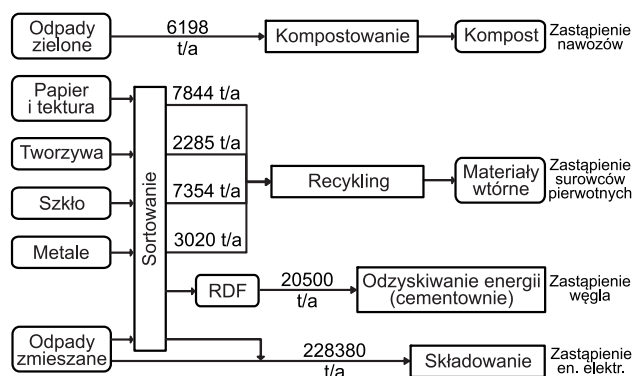
## Wyniki analizy cyklu życia (LCA)

Wyniki oceny cyklu życia analizowanych wariantów systemu gospodarki odpadami przedstawiono w postaci znormalizowanej, aby umożliwić porównywanie rodzaju oddziaływań w różnych kategoriach. Wyniki po normalizacji zostały odniesione do całkowitego oddziaływania na środowisko emisji z przemysłu, energetyki, transportu, gospodarki komunalnej itd. na określonym obszarze w danym roku. W oparciu o inwentaryzację emisji substancji i zużycia surowców, model LCA-IWM pozwala wyliczyć wartości następujących wskaźników wpływu na środowisko:

- zużycie naturalnych surowców mineralnych,
- zmiana klimatu,
- toksyczność dla ludzi,
- emisja fotoutleniaczy,
- zakwaszenie środowiska,
- eutrofizacja.

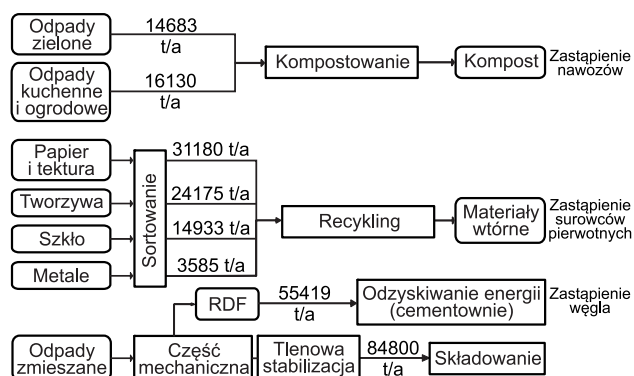
Całkowite charakterystyczne wartości tych wskaźników wyrażone są w postaci wielkości absolutnych oraz w postaci znormalizowanej, tj. odpowiadającej oddziaływaniu określonej liczby mieszkańców równoważnych.

Oprócz strumieni odpadów, oceną objęto także strumienie produktów wytworzonych w wyniku przetwarzania odpadów, takich jak surowce wtórne uzyskane z odpadów przydatnych do recyklingu, kompost otrzymany z bioodpadów oraz energia wytworzona w procesach termicznego przetwarzania odpadów. Wytwarzanie tych produktów stanowi pozytywny efekt nazywany „korzyścią”, a ilościowo odpowiada tzw. unikniętym oddziaływaniom na środowisko w wyniku zastąpienia konwencjonalnych procesów ich



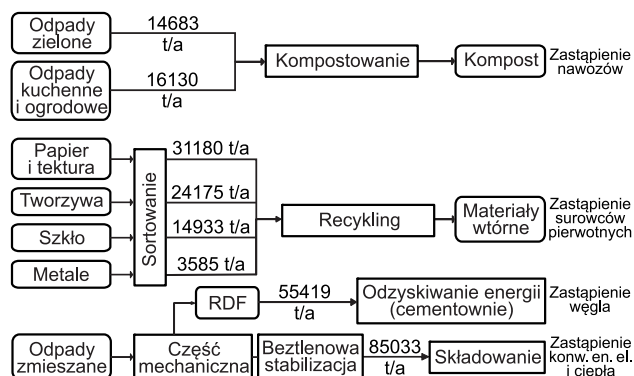
Rys. 3. Schemat obecnego systemu gospodarki odpadami komunalnymi

Fig. 3. Current scenario of municipal waste management



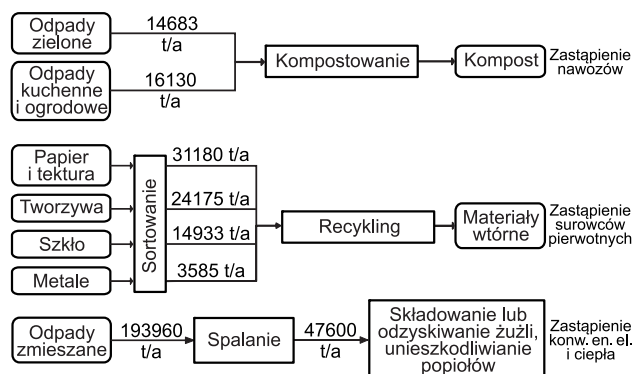
Rys. 4. Wariant I z tlenową stabilizacją biofrakcji odpadów

Fig. 4. Scenario I with aerobic stabilization of biofraction



Rys. 5. Wariant II z beztlenową stabilizacją biofrakcji odpadów i odzyskiem energii z biogazu

Fig. 5. Scenario II with anaerobic stabilization of biofraction and energy recovery from biogas



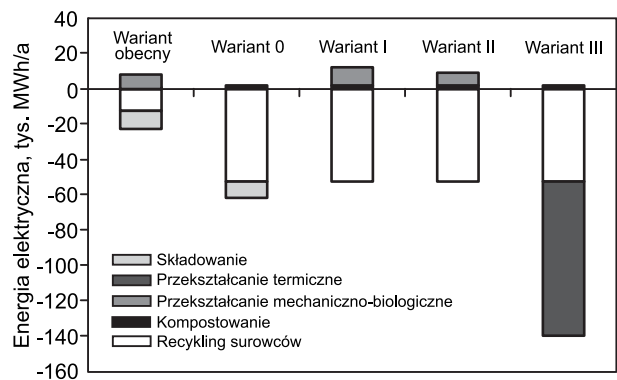
Rys. 6. Wariant III ze spalaniem odpadów zmieszanych

Fig. 6. Scenario III with incineration of mixed waste

wytwarzania z surowców pierwotnych. Zatem korzyść (zwana też kredytem) w postaci ujemnych ilości zużytej energii, przepływów materiałów i emisji równoważnych ilościom zastąpionych przez nie pierwotnych zasobów, jest przydzielana do odpowiedniego procesu. Przykładowo, w procesie termicznego przetwarzania, oprócz unieszkodliwienia odpadów, ma miejsce skojarzona produkcja energii elektrycznej i ciepłej. Każdej jednostce energii elektrycznej oraz energii ciepłej wytworzonej w skojarzeniu przydzielana jest korzyść w postaci ujemnych przepływów odniesionych do jednostki energii elektrycznej i ciepłej wytworzonych w kogeneracji w konwencjonalnej elektrociepłowni. Zastosowanie paliw z odpadów, tzw. stałych paliw wtórnych (refused derived fuel – RDF), np. w cementowni, wiąże się z uniknięciem wykorzystania węgla jako źródła energii ciepłej. Z tego powodu w LCA w przypadku gospodarki odpadami często występuje tzw. ujemne oddziaływanie na środowisko. Wynika to z zastosowania opisanej metody obliczeniowej oraz z faktu, że w większości przypadków emisje powstające w procesach odzyskiwania i recyklingu odpadów są mniejsze od emisji powstających w odpowiednich konwencjonalnych procesach produkcyjnych, wykorzystujących surowce pierwotne. Tabela 2 zawiera podsumowanie otrzymanych wyników dotyczących wytwarzanych produktów, w tym energii, a także frakcji wymagających dalszego zagospodarowania w systemie gospodarki odpadami.

Przedstawiony na rysunku 7 bilans zużycia/odzyskania energii elektrycznej w poszczególnych wariantach wykazał, że ogólnie przeważały procesy, w których odzyskuje się energię elektryczną, przy czym:

- największy stopień jej odzyskania jest wynikiem termicznego przetwarzania odpadów zmieszanych (wariant III), a także recyklingu surowców (wszystkie warianty oprócz obecnego),



Rys. 7. Bilans zużycia/odzyskania energii elektrycznej w poszczególnych wariantach  
Fig. 7. Electric energy consumption/electric energy recovery balance in particular scenarios

- pozytywny wpływ na bilans energetyczny ma również odzyskanie energii elektrycznej z biogazu składowiskowego (wariant obecny i wariant zwiększonego recyklingu),

- procesy mechanicznego przetwarzania (sortowanie) i przetwarzania mechaniczno-biologicznego wykazują zużycie energii elektrycznej (zbilansowane przez korzyść z odzyskania surowców),

- różnica w bilansie energii elektrycznej między tlenową a beztlenową stabilizacją nie była zbyt duża; nieco mniejsze zużycie netto energii elektrycznej wystąpiło w technologii beztlenowej, w której było ono równoważone częściowo przez wytworzoną energię elektryczną z biogazu, jednak jego znaczenie w ogólnym bilansie nie było duże,

- zdecydowanie najkorzystniejszy okazał się wariant III, obejmujący spalanie odpadów zmieszanych.

Na rysunkach 8 i 9 zilustrowano wyniki analizy wpływu wariantów gospodarki odpadami na środowisko w sześciu

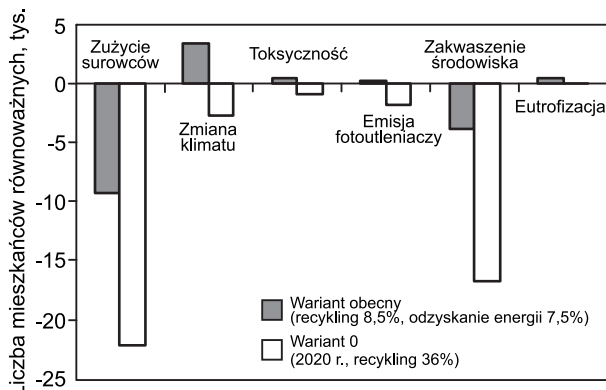
Tabela 2. Warianty systemu gospodarki odpadami  
Table 2. Scenarios of waste management

Składnik/wskaźnik, jednostka	Wariant obliczeń				
	obecny	zwiększony recykling (0)*	tlenowa stabilizacja (I)	beztlenowa stabilizacja (II)	spalanie (III)
odzyskane surowce i inne produkty przetwarzania odpadów					
Papier, tys. t/a	7,844	31,180	31,180	31,180	31,180
Szkło, tys. t/a	2,285	14,933	14,933	14,933	14,933
Tworzywa sztuczne, tys. t/a	7,354	24,175	24,175	24,175	24,175
Metale, tys. t/a	3,020	3,585	3,585	3,585	3,585
Inne zebrane selektywne, tys. t/a	–	5,921	5,921	5,921	5,921
Kompost, tys. t/a	2,448	10,456	10,456	10,456	10,456
Paliwa wtórne (RDF), tys. t/a	20,500	–	55,419	55,419	–
Wartość opałowa, MJ/kg	–	–	16,5	16,5	8,6
pozostałości odpadów do unieszkodliwienia					
Odpady do składowania, tys. t/a	228,380	169,769	–	–	–
Stabilizat i inne odpady do składowania, tys. t/a	–	–	84,800	85,033	47,600
bilans energii**					
Zużycie/odzyskanie energii, GWh/a	–15,609	–56,536	–50,409	–53,586	–138,900
Zużycie/odzyskanie ciepła, TJ/a	–	–	–	–75,855	–934,737
Zużycie paliwa (napęd maszyn i pojazdów), m <sup>3</sup> /a	217,021	261,670	365,856	365,856	1,225

\*wariant polegający na zwiększonym recyklingu i bezpośrednim składowaniu pozostałych odpadów (niezgodny z wymogami, lecz uwzględniony w celu zobrazowania korzyści wynikających z recyklingu)

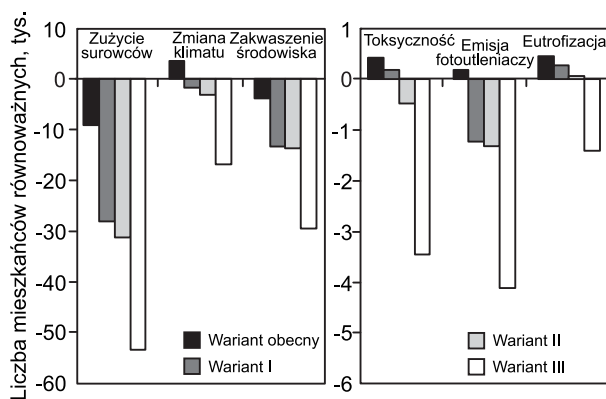
\*\*wartości dodatnie oznaczają zużycie energii netto, a wartości ujemne jej odzyskanie





Rys. 8. Ocena wpływu obecnego i zwiększonego recyklingu surowców z odpadów na środowisko

Fig. 8. Environmental impact of current and increased raw material recycling from waste



Rys. 9. Wyniki LCA  
Fig. 9. Results of LCA

kategoriach LCA. Rysunek 8 przedstawia porównanie wpływu na środowisko w poszczególnych kategoriach w wyniku zwiększenia recyklingu surowców i recyklingu organicznego bioodpadów (w 2020 r.) w porównaniu do stanu obecnego. Zwiększenie recyklingu surowców miało bardzo duży pozytywny wpływ na wynik LCA we wszystkich kategoriach. Surowce do recyklingu mogą być pozyskiwane przede wszystkim w wyniku zbierania selektywnego wybranych frakcji odpadów. Surowce wydzielane mechanicznie ze strumienia odpadów zmieszanych w zakładach przetwarzania mechaniczno-biologicznego mają gorszą jakość od surowców zbieranych selektywnie, zatem sortowanie zmieszanych odpadów może być jedynie uzupełnieniem selektywnego zbierania surowców. W metodyce LCA nie jest jednak możliwa ocena wpływu jakości surowców na wynik końcowy oddziaływania na środowisko. Zakłada się, że wszystkie surowce, niezależnie od sposobu ich pozyskania, zostaną poddane takiemu samemu procesowi recyklingu. W rzeczywistości to, czy zostanie uzyskany aż tak wysoki efekt poprawy oddziaływania na środowisko zależeć będzie od tego, czy znajdzie się rynek zbytu na te surowce.

Rysunek 9 zawiera porównanie wyników LCA wg wariantu obecnego oraz wariantów I–III. Na bilans końcowy zużycia surowców wpływ miało zarówno odzyskanie surowców wtórnych, jak i energii (w formie paliw wtórnych lub bezpośrednio – energii elektrycznej i ciepła w kogeneracji). Odzyskanie energii w systemie gospodarki odpadami jest jednoznacznie z oszczędnością paliw kopalnych, które są głównymi surowcami wykorzystywanymi do wytwarzania energii konwencjonalnej w Polsce (przyjęto, że zastąpiony proces to produkcja energii elektrycznej i ciepłej

w kogeneracji). Jednocześnie konwencjonalne procesy wytwarzania energii (w Polsce głównie z węgla kamiennego i brunatnego) wiążą się z większą niż w gospodarce odpadami emisją do atmosfery m.in.  $\text{SO}_2$ , będącego głównym gazem odpowiedzialnym za zakwaszenie środowiska. Wykazano ścisłą korelację między obydwoma wskaźnikami LCA. Na kategorię zmian klimatu największy wpływ miała emisja gazów cieplarnianych – dwutlenku węgla, metanu i podtlenku azotu. W tej kategorii zdecydowanie najbardziej niekorzystny okazał się wariant obecny, obejmujący składowanie nieprzetworzonych odpadów komunalnych związane z emisją biogazu podczas eksploatacji składowiska (mimo założenia, że jest to składowisko w pełni kontrolowane, z odzyskiwaniem energii). Toksyczność dla ludzi obejmuje wpływ emisji m.in. metali ciężkich i związków organicznych (m.in. dioksyn) na zdrowie ludzi, z uwzględnieniem modeli transportu tych zanieczyszczeń oraz ścieżki ekspozycji i ich przenikania do organizmu (wdychanie, przyjmowanie wraz z pokarmem i wodą oraz w kontakcie ze skórą). Ujemna wartość tego wskaźnika w wariantach II i III świadczyła o tym, że emisja tego typu zanieczyszczeń powstających w systemie gospodarki odpadami była mniejsza niż w konwencjonalnych procesach wytwórczych tych samych materiałów i energii, które odzyskano z odpadów. W przypadku eutrofizacji, związanej z emisją związków azotu i fosforu, wskaźnik oddziaływania był większy w przypadku procesów biologicznych, a najmniejszy w przypadku spalarni odpadów.

## Podsumowanie

Gospodarka odpadami jest częścią globalnej gospodarki zasobami materiałów i energii, w tym energii ze źródeł odnawialnych. Jednym z istotnych narzędzi oceny środowiskowych efektów gospodarki odpadami jest LCA – ocena cyklu życia, której wyniki mogą być podstawą do odstąpienia od stosowania hierarchii postępowania z odpadami. Przedstawione wyniki analizy cyklu życia (LCA) systemu gospodarki odpadami we Wrocławiu jednoznacznie wykazały, że najkorzystniejszym z analizowanych wariantów okazał się zwiększony recykling połączony z termicznym przetwarzaniem pozostałych odpadów zmieszanych. Ten wariant zapewnił odzyskanie największej ilości energii z odpadów. Najmniej korzystny okazał się wariant obecny, oparty głównie na składowaniu odpadów. W porównywalnych procesach, wykorzystujących przetwarzanie mechaniczno-biologiczne odpadów, powstaje frakcja paliwowa (paliwa wtórne), jednak jej zastosowanie w cementowni, wyłącznie jako substytutu węgla kamiennego do wytwarzania energii cieplnej, wiąże się z mniejszą korzyścią dla środowiska. Bardziej korzystna byłaby opcja wykorzystania stałych paliw wtórnych (RDF) w technologii współspalania w elektrociepłowni. Spośród procesów biologicznego przetwarzania biofrakcji korzystniejszy okazał się wariant beztlenowy, mimo większych nakładów energetycznych na przygotowanie wsadu do fermentacji. Wariant ten zakładał odzyskanie energii biogazu z odpadów ulegających biodegradacji oraz wiązał się z mniejszą emisją, głównie związków toksycznych dla ludzi. Warto dodać, że biogaz w całości jest traktowany jako odnawialne źródło energii, natomiast energia ze spalania odpadów komunalnych tylko w 42% jest zaliczana do źródeł odnawialnych.

Należy podkreślić, że racjonalna gospodarka odpadami komunalnymi, dzięki odzyskowi surowców i energii i zastąpieniu nimi kopalnych surowców i paliw, wbrew powszechnym – z reguły krytycznym – ocenom, przyczynia się

istotnie do zmniejszenia globalnej emisji zanieczyszczeń do środowiska (zwłaszcza do powietrza) spowodowanej przede wszystkim działalnością gospodarczą.

*Artykuł powstał w ramach projektu „Zielony Transfer” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.*

## LITERATURA

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz zmieniająca niektóre dyrektywy.
2. A. KRASZEWSKI, E. PIETRZYK-SOKULSKA [red.]: Ocena systemu gospodarki odpadami. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 2011.
3. E. den BOER, J. den BOER, J. JAGER: Planowanie i optymalizacja gospodarki odpadami – podręcznik prognozowania ilości i jakości odpadów komunalnych oraz oceny zgodności systemów gospodarki odpadami z zasadami zrównoważonego rozwoju. PZITS Oddział Dolnośląski, WAMECO, Wrocław 2005.
4. G. OBERSTEINER, E. BINNER, P. MOSTBAUER, S. SALHOFER: Landfill modelling in LCA – A contribution based on empirical data. *Waste Management* 2007, Vol. 27, pp. 58–74.
5. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA, B. SKORUPSKA, A. WIENIEWSKI: Analiza geostatystyczna zmienności parametrów technologicznych popiołów zużytych na składowisku odpadów przemysłowych. *Ochrona Środowiska* 2012, vol. 34, nr 2, ss. 43–48.
6. D. KULIKOWSKA, E. KACZÓWKA, M. KUCZAJOWSKA-ZADROŻNA: Nityfikacja azotu amonowego w odciekach składowiskowych w reaktorach z ruchomym złożem zawieszonym (MBBR) pracujących w układzie dwustopniowym. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 2, ss. 49–52.
7. M.L. SÖDERMAN: Including indirect environmental impacts in waste management planning. *Resources, Conservation and Recycling* 2003, Vol. 38, pp. 213–241.
8. E. STASZEWSKA, M. PAWŁOWSKA: Characteristics of emissions from municipal waste landfills. *Environment Protection Engineering* 2011, Vol. 37, No. 4, pp. 119–130.
9. M. WITTMAYER, S. LANGER, B. SAWILLA: Possibilities and limitations of life cycle assessment (LCA) in the development of waste utilization systems: Applied examples for a region in Northern Germany. *Waste Management* 2009, Vol. 29, pp. 1732–1738.
10. L. TIRUTA-BARNA, E. BENETTO, Y. PERRODIN: Environmental impact and risk assessment of mineral wastes reuse strategies: Review and critical analysis of approaches and applications. *Resources, Conservation and Recycling* 2007, Vol. 50, pp. 351–379.
11. E. ŚLIWKA, B. KOŁWZAN, K. GRABAS, J. KLEIN, R. KORZEN: Chemical composition and biological properties of weathered drilling wastes. *Environment Protection Engineering* 2012, Vol. 38, No. 1, pp. 129–138.
12. S.E. DANIEL, C.P. PAPPIS: Application of LCIA and comparison of different EOL scenarios: The case of used lead-acid batteries. *Resources, Conservation and Recycling* 2008, Vol. 52, pp. 883–895.
13. C.-J. RYDH, M. KARLSTROM: Life cycle inventory of recycling portable nickel-cadmium batteries. *Resources, Conservation and Recycling* 2002, Vol. 34, pp. 289–309.
14. M. ERLANDSSON, M. BORG: Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services – today practice and development needs. *Building and Environment* 2003, Vol. 38, pp. 919–938.
15. O. ORTIZ, F. CASTELLS, G. SONNEMANN: Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials* 2009, Vol. 23, pp. 28–39.
16. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. United Nations Environment Programme, 2009.
17. O. ERIKSSON, M. BISAILLON: Multiple system modeling of waste management. *Waste Management* 2011, Vol. 31, No. 12, pp. 2620–2630.
18. Ocena strategiczna system gospodarki odpadami na terenie Aglomeracji Wrocławskiej na lata 2010–2020. Agencja Rozwoju Aglomeracji Wrocławskiej, Wrocław 2011.

### den Boer, E., Szpadt, R. Life Cycle Assessment of the Waste Management System in the City of Wrocław. *Ochrona Środowiska* 2012, Vol. 34, No. 3, pp. 39–44.

**Abstract:** Life cycle assessment (LCA) was carried out to select municipal waste management scenarios for the city of Wrocław, assuming the time horizon of the year 2020. The results of LCA have clearly shown that among the analyzed scenarios the most advantageous is the one combining increased recycling with thermal treatment (incineration) of residual mixed waste, because this option provides the highest energy recovery. The scenario with anaerobic stabilization of the biofraction during mechanical-biological treatment of the waste is a more advantageous option than the one with aerobic stabilization, owing to the potential for energy recovery from biogas. Biogas is entirely considered as a renewable energy source (RES), while only

42% of energy from waste incineration is regarded as RES. The refuse-derived fuel (RDF) fraction sorted out during mechanical-biological treatment of the waste can be used in a cement kiln as a substitute of hard coal for the generation of heat energy, but far more friendly for the environment would be the use of RDF in the co-combustion technology applied in power and heat generating plants. The least advantageous among the analyzed scenarios of waste management was found to be the current scenario where direct landfilling is the preferred disposal option. Rational waste management contributes largely to the reduction in global, economic-activity-related emissions of wastes to the environment in general, and to the atmosphere in particular.

**Keywords:** Life cycle assessment (LCA), municipal waste, thermal treatment, mechanical-biological treatment, recycling, energy recovery.