

## **Narzędzia oceny cyklu życia (LCA) a modelowanie systemów gospodarki odpadami**

### **1. Wprowadzenie**

Ocena cyklu życia (life cycle assessment, LCA) jest techniką zarządzania środowiskowego, która umożliwia oszacowanie obciążenia środowiskowego spowodowanego przez dany produkt, proces lub usługę, poprzez zebranie i ocenę wejść, wyjść oraz potencjalnych wpływów na środowisko systemu wyrobu lub jego procesów jednostkowych w okresie cyklu życia [ISO 14040]. Tym samym daje ona możliwość holistycznego spojrzenia na relacje pomiędzy danym wyrobem a otaczającym go środowiskiem. Jest to również narzędzie dla projektantów pozwalające na poszukiwanie rozwiązań zmniejszających skalę zagrożeń związanych z danym wyrobem dla środowiska naturalnego [Kaczmarka, Gierulski 2014]. To nowe spojrzenie burzy wiele utartych poglądów na temat uciążliwości lub też pro-środowiskowego charakteru wielu produktów, procesów i usług.

Pozycja techniki oceny cyklu życia w zarządzaniu środowiskowym umocniła się dzięki wprowadzeniu jej wymagań, zasad sporządzania i interpretacji wyników do norm serii ISO 14000. I tak problematykę LCA określają normy ISO 14040, których polskimi odpowiednikami są:

- PN-EN 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura, oraz
- PN-EN 14044:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne.

Ocena cyklu życia (LCA) jest procesem skomplikowanym i wieloetapowym, w którym można wyróżnić cztery podstawowe fazy, takie jak:

- zdefiniowanie celu i zakresu analizy;
- analiza zbioru wejść i wyjść (life cycle inventory, LCI);
- ocena wpływu cyklu życia (life cycle impact assessment, LCIA);
- interpretacja wyników.

Analizując możliwe obszary zastosowania techniki LCA, można dojść do przekonania, iż jest ona coraz powszechniej wykorzystywane do projektowania,

udoskonalania i porównywania procesów produkcyjnych i usługowych. Daje ona bowiem możliwość panowania nad procesem, informuje o procesach, pozwala doskonalić procesy w kontekście ich wpływu na środowisko, a także redukować ich negatywny wpływ [Zarębska 2011]. Przykładem takiego wykorzystania LCA może być modelowanie zintegrowanych systemów gospodarki odpadami, niejednokrotnie obejmujące recykling, termiczne przekształcanie oraz unieszkodliwianie a tym samym stanowiące skompilowane procesy technologiczne. I tak główną zasadą, zgodnie z koncepcją oceny cyklu życia (LCA), jaką powinno kierować się podczas modelowania systemów nakierowanych na recykling odpadów, jest maksymalizowanie ponownego wykorzystania zawartych w odpadach surowców przy równoczesnym minimalizowaniu obciążeń środowiskowych (nakłady surowcowe i energetyczne oraz emitowane zanieczyszczenia) związanych z ich pozyskaniem i przetworzeniem.

Kompleksowe oszacowanie obciążenia środowiskowego danego systemu gospodarki odpadami z uwzględnieniem wskazanych powyżej elementów jest niezwykle złożonym zadaniem. Problem ten jednak został do pewnego stopnia rozwiązany poprzez stosowanie specjalistycznych programów (narzędzi) komputerowych wspomagających prowadzenie analiz LCA. Celem niniejszego opracowania jest analiza dostępnych narzędzi LCA wykorzystywanych do modelowania systemów gospodarki odpadami.

## **2. Charakterystyka narzędzi oceny cyklu życia (LCA) dedykowanych do modelowania gospodarki odpadami**

Z uwagi na złożoność modelowania w oparciu o ocenę cyklu życia (LCA) istnieje szerokie spektrum narzędzi wspomagających prowadzenie tego typu analiz. Umożliwiają one budowanie profilu środowiskowego (life cycle impact assessment, LCIA) danego systemu wyrobu. Stosowane oprogramowania można podzielić na te o charakterze ogólnym przeznaczone do modelowania wszystkich rodzajów systemu wyrobu oraz narzędzia dedykowane określonemu produktowi, procesowi lub usłudze.

### **2.1. Ogólne narzędzia LCA**

Do powszechnie stosowanych narzędzi o charakterze ogólnym należą SimaPro, Umberto, Gabi oraz OpenLCA. Wszystkie powyższe oprogramowania cechuje bardzo duży uniwersalizm a tym samym mogą być one stosowane do prowadzenia analiz LCA zarówno produktów jak i procesów. Ponadto oprogramowania te są kompatybilne z

bazą danych wejść i wyjść (life cycle inventory, LCI) ecoinvent. Dodatkowo narzędzie Umberto umożliwia prowadzenie łącznej oceny cyklu życia aspektów środowiskowych i ekonomicznych w jednym modelu.

Oprogramowania LCA o charakterze ogólnym mogą być wykorzystywane do analizowania zintegrowanych systemów gospodarki odpadami, ad exemplum metod odzysku i unieszkodliwiania odpadów, czy danej instalacji gospodarki odpadami. Żaden z powyższych narzędzi jednak, pomimo wielu istotnych zalet, nie umożliwia modelowania przepływu odniesienia, składającego się z mieszanki materiałów „add-on models” [An environmental assessment system... 2014]. LCA gospodarki odpadami, w przeciwieństwie do LCA produktu, ma na celu ocenę wydajności ekologicznej szeregu połączonych technologii zagospodarowania odpadów w oparciu o skład odpadów od momentu ich wytworzenia aż do ostatecznego odzysku lub unieszkodliwiania.

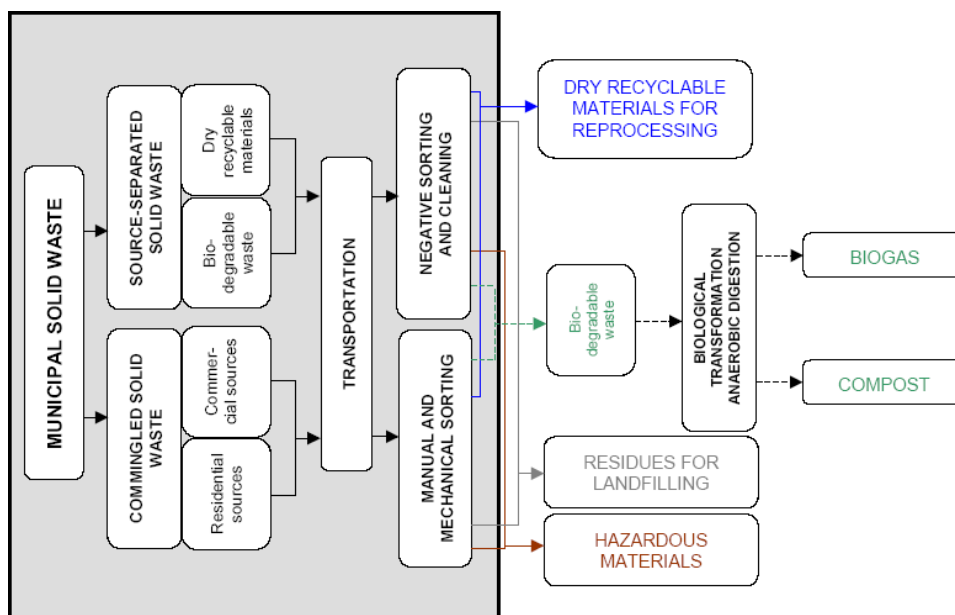
Przegląd ponad 200 badań LCA z zakresu gospodarki odpadami wykazał, iż dedykowane narzędzia LCA a nie te o charakterze ogólnym są preferowane do wykonywania systemowych analiz z zakresu gospodarki odpadami [Review of LCA studies ... 2014].

## **2.2. Dedykowane narzędzia LCA**

Istnieje szerokie spektrum narzędzi, dedykowanych prowadzeniu analiz oceny cyklu życia (LCA) systemów gospodarki odpadami. Wśród nich wymienić należy:

- ISWM DST opracowany przez Uniwersytet stanowy Karoliny Północnej,
- LCA-IWM opracowany w ramach projektu Unii Europejskiej pod kierownictwem Uniwersytetu Technicznego w Darmstadt,
- EASETECH opracowany przez Duński Uniwersytet Techniczny w Kopenhadze,
- WRATE opracowany przez organizację Golder Associates a ufundowany przez Agencję Ochrony Środowiska Anglii i Walii oraz
- IWM-PL opracowany na podstawie oprogramowania LCA-IWM.

Zdecydowana większość z powyższych oprogramowań przeznaczona jest jednak do prowadzenia analiz LCA określonego rodzaju odpadów, np. odpadów ulegających biodegradacji lub określonej technologii postępowania z odpadami [Modern solid waste... 2013]. Tylko wybrane z nich, w tym EASETECH, umożliwiają zatem modelowanie zintegrowanych systemów gospodarki odpadami, począwszy od wytwarzania poprzez gromadzenie i transport aż do odzysku (cradle-to-cradle analysis) lub unieszkodliwiania (cradle-to-grave analysis) (rys. 1).



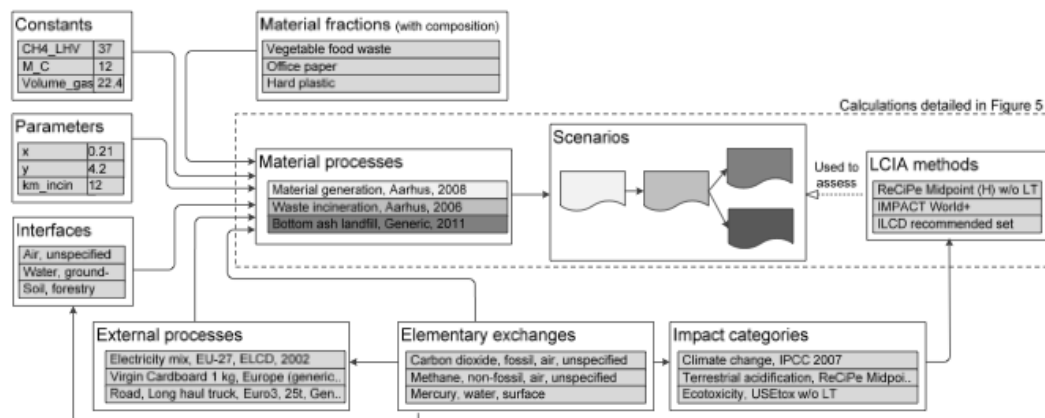
**Rys. 1. Zintegrowany system gospodarki odpadami**

(Źródło: Schluchter, Rybaczewska-Błażejowska 2012)

### 2.3. Oprogramowanie EASETECH

Narzędzie EASETECH (Environmental Assessment System for Environmental Technologies) stanowi specjalistyczne oprogramowanie dedykowane do prowadzenia złożonych analiz LCA systemów gospodarki odpadami. Oprogramowanie to, którego początki sięgają 2001r. (aktualna wersja tworzona jest od 2010r.) zostało opracowane przez międzywydziałową grupę badawczą Duńskiego Uniwersytetu Technicznego w Kopenhadze w ramach grantu badawczego. EASETECH wykorzystywany jest do badań LCA przez wiele wiodących ośrodków naukowych w Europie i na świecie, zaś w Polsce licencję na jego stosowanie posiada Politechnika Świętokrzyska.

EASETECH posiada wiele znamienych cech, które sprawiają, iż staje się on wiodącym oprogramowaniem wykorzystywanym do analiz LCA zintegrowanych systemów gospodarki odpadami. Przede wszystkim umożliwia modelowanie niejednorodnego pod względem masy i składu strumienia materiałów, jakim są odpady. Posiada rozbudowaną i aktualizowaną bazę danych dotyczącą składów morfologicznych odpadów, w tym również dla krajów Europy Środkowej i Wschodniej, transportu odpadów oraz technologii odzysku i unieszkodliwiania odpadów. Ponadto posiada rozbudowaną bibliotekę kategorii wpływu oraz metod LCIA (rys. 2).



**Rys. 2. Atrybuty oprogramowania EASETECH**

(Źródło: Clavreul 2013)

Zgodnie z obowiązującymi normami serii ISO 14040, ocena cyklu życia (LCA) systemów gospodarki odpadami powinna obejmować cztery etapy:

- określenie celu i zakresu,
- analiza zbioru wejść i wyjść (life cycle inventory, LCI),
- ocena wpływu cyklu życia (life cycle impact assessment, LCIA) oraz
- interpretacja wyników.

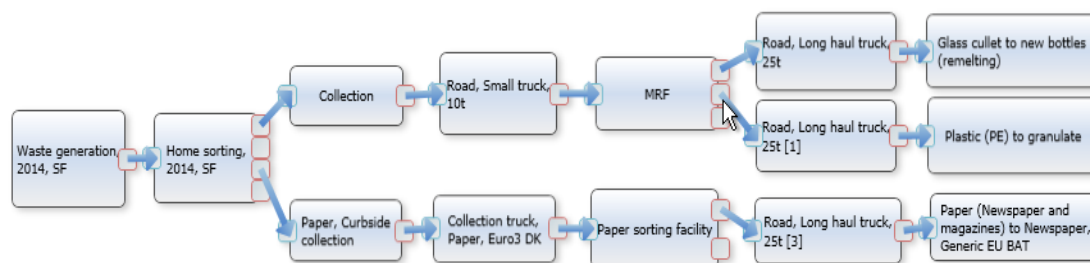
Przeprowadzona w ten sposób analiza daje możliwość inwentaryzacji wszystkich czynników środowiskowych występujących od momentu wytwarzania i zbierania odpadów aż do miejsca ostatecznego zagospodarowania, następnie przypisania ich do wybranych kategorii wpływu oraz interpretacji uzyskanych wyników w oparciu o wykonane analizy statystyczne [Rybczewska-Błażejowska 2013].

### 2.3.1. Cel i zakres LCA w programie EASETECH

Program EASETECH jest narzędziem umożliwiającym modelowanie systemów gospodarki odpadami i inwestycji z nimi związanych, dlatego też najczęściej celem prowadzonych z jego wykorzystaniem analiz LCA jest zbadanie a w efekcie optymalizacja, w ujęciu środowiskowym a pośrednio również ekonomicznym, powyższych. Badanie może być wykonywane zarówno na etapie projektowania systemu gospodarki odpadami – podejmowaniu istotnych decyzji inwestycyjnych, jak również na etapie jego funkcjonowania.

LCA wykonywane z wykorzystaniem oprogramowania EASETECH może mieć bardzo różny zakres, począwszy od pojedynczych procesów – recykling odpadów (MBP), termiczne przekształcanie, składowanie, a skończywszy na modelowaniu

złożonych systemów gospodarki odpadami – od wytwarzania odpadów do ich finalnego zagospodarowania (rys. 3). Zasięg analizy może mieć charakter lokalny albo regionalny.



**Rys. 3. Przykładowe granice systemu dla procesu recyklingu opracowane z wykorzystaniem oprogramowania EASETECH**

(Źródło: Opracowanie własne)

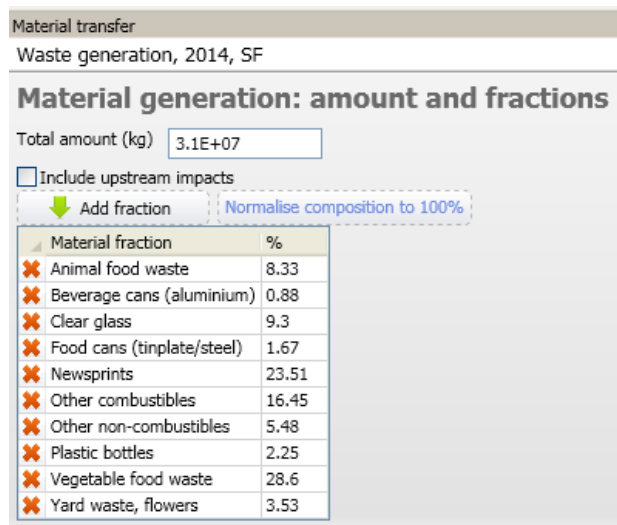
Celem przeprowadzenia kolejnych faz LCA użytkownik definiuje jednostkę funkcjonalną, która ma opisywać ilościowe i jakościowe funkcje wyrobu oraz umożliwić dostarczenie płaszczyzny odniesienia dla normalizowania danych wejściowych i wyjściowych. W programie EASETECH domyślną, proponowaną jednostką funkcjonalną jest ilość odpadów wytworzona w ciągu roku na danym obszarze, wyrażona w kg.

### 2.3.2. Analiza zbioru wejść i wyjść LCI w programie EASETECH

Modelowanie systemów gospodarki odpadami z wykorzystaniem oprogramowania EASETECH w oparciu o metodę LCA wymaga wprowadzenia szeregu danych dotyczących źródeł interwencji bezpośrednio w środowisko przyrodnicze, w tym zużywane zasoby i emisje zanieczyszczeń do pedosfery, atmosfery, czy hydrosfery, oraz w środowisko antropogeniczne, w tym wytwarzane odpady, czy zużywane materiały. Dane te mogą pochodzić albo od praktyków gospodarki odpadami, w tym zarządzających systemami gospodarki odpadami oraz inwestorów, albo z bazy danych zawartej w programie.

Podstawowe dane, jakie użytkownik powinien pozyskać i wprowadzić do programu EASETECH dotyczą analizowanego systemu gospodarki odpadami, w tym przede wszystkim ilości i składu morfologicznego odpadów oraz bilansu paliwo-energetycznego (rys. 4). Ponadto opisując poszczególne etapy – sortowanie odpadów, transport, czy wreszcie zagospodarowanie można wykorzystać szablony procesów, ale wówczas należy je uzupełnić o dane dotyczące emitowanych zanieczyszczeń

(elementary exchanges) oraz dane środowiskowe dotyczące powiązanych procesów (external processes).



Material transfer  
Waste generation, 2014, SF

**Material generation: amount and fractions**

Total amount (kg)

Include upstream impacts

Material fraction	%
✗ Animal food waste	8.33
✗ Beverage cans (aluminium)	0.88
✗ Clear glass	9.3
✗ Food cans (tinplate/steel)	1.67
✗ Newsprints	23.51
✗ Other combustibles	16.45
✗ Other non-combustibles	5.48
✗ Plastic bottles	2.25
✗ Vegetable food waste	28.6
✗ Yard waste, flowers	3.53

**Rys. 4. Przykładowe dane wejściowe dotyczące ilości i jakości odpadów wprowadzane przez użytkownika oprogramowania EASETECH**

(Źródło: Opracowanie własne)

Narzędzie EASETECH posiada wbudowaną i aktualizowaną bazę danych z której użytkownik, modelując system gospodarki odpadami, może skorzystać. Obejmuje ona, między innymi,:

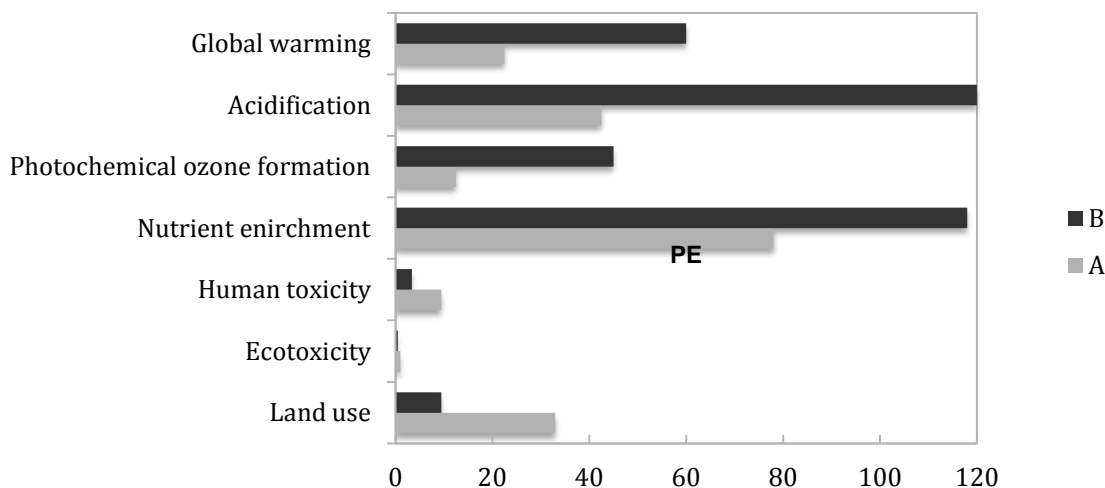
- dane dotyczące składów morfologicznych odpadów,
- dane odnośnie procesów związanych z odpadami, w tym wielkość i rodzaj emitowanych zanieczyszczeń,
- dane odnośnie procesów zewnętrznych, towarzyszących gospodarce odpadami, w tym wytwarzanie energii, produkcja materiałów, czy transport,
- bibliotekę kategorii wpływu oraz metod LCIA.

Opracowując bazę danych do oprogramowania EASETECH wykorzystano europejską bazę LCA (European reference Life Cycle Database, ELCD) obejmującą inwentaryzację danych wejściowych i wyjściowych dla kluczowych materiałów, nośników energii, transportu i gospodarki odpadami.

### **2.3.3. Ocena wpływu cyklu życia LCIA w programie EASETECH**

Kolejny etap LCA jest ukierunkowany na zrozumienie i ocenę wielkości oraz znaczenia potencjalnego wpływu modelowanego systemu gospodarki odpadami na środowisko. Dlatego też w ocenie wpływu w programie EASETECH wykorzystuje się modelowanie kwestii środowiskowych, nazywanych kategoriami wpływu. Zbiór

wartości wskaźnika tworzy profil LCIA danego systemu gospodarki odpadami, który może być podstawą do identyfikowania procesów, technologii o największym negatywnym wpływie na środowisko (rys. 5).



**Rys. 5. Przykładowy znormalizowany profil środowiskowy sytemu gospodarki odpadami wykonany z wykorzystaniem oprogramowania EASETECH**

(Źródło: Materiały szkoleniowe EASETECH 2014)

Zebrane podczas inwentaryzacji danych aspekty środowiskowe, dotyczące przede wszystkim zużycia zasobów (np. energii) lub emisji do powietrza (np. tlenek i dwutlenek węgla, metan, pyły), gleby (np. kadm, rtęć, arsen) i wody (np. siarka, chlor, bor), są przyporządkowywane do odpowiednich kategorii wpływu (klasyfikacja) a następnie przeliczane na wartość wskaźnika kategorii wpływu (charakteryzowanie) (tab. 1).

**Tabela 1. Klasyfikacja danych LCI do przykładowych kategorii wpływu**

Kategoria wpływu	Zakres danych LCI (klasyfikacja)	Wskaźnik kategorii	Opis wskaźnika kategorii
Zmiany klimatyczne	dwutlenek węgla (CO <sub>2</sub> ) dwutlenek azotu (NO <sub>2</sub> ) metan (CH <sub>4</sub> ) freony (CFC, HCFC) bromek metylu (CH <sub>3</sub> Br)	potencjał globalnego ocieplenia - kg równoważnika CO <sub>2</sub> na jednostkę funkcjonalną	przekształca wyniki LCI na równoważnik CO <sub>2</sub>
Zakwaszenie	tlenki siarki (SO <sub>x</sub> ) tlenki azotu (NO <sub>x</sub> ) chlorowódór (HCl) fluorowódór (HF) amoniak (NH <sub>3</sub> )	potencjał zakwaszenia - kg równoważnika SO <sub>2</sub> lub H <sup>+</sup>	przekształca wyniki LCI na równoważnik SO <sub>2</sub>
Eutrofizacja	fosforany azotany amoniak (NH <sub>3</sub> ) tlenki azotu (NO <sub>x</sub> )	potencjał eutrofizacji – kg równoważnika PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> lub P	przekształca wyniki LCI na równoważnik PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>



Wykorzystanie terenu	powierzchnia wykorzystanego terenu w m <sup>2</sup>	potencjał antropopresji – m <sup>2</sup> wykorzystanego terenu na jednostkę funkcjonalną	przekształca wyniki LCI na – m <sup>2</sup> wykorzystanego terenu
Zubożenie zasobów naturalnych	ilość zużytych surowców mineralnych i paliw kopalnych	potencjał zmniejszenia zasobów naturalnych	przekształca wyniki LCI na stosunek ilości wykorzystanych zasobów do ilości zasobów pozostałych w przyrodzie

(Źródło: Opracowanie własne na podstawie Tukker 2002)

Dobór kategorii wpływu zależy od wybranej metody LCIA. Możliwe do wybrania metody LCIA w oprogramowaniu EASETECH to IPCC 2007, EDIP 97/2003 oraz ILCD 2013. Przykładowe kategorie wpływu rekomendowanej metody ILCD 2013 obejmują zmiany klimatyczne, zubożenie warstwy ozonowej, szkodliwość dla ludzi, eutrofizację, zubożenie zasobów, zakwaszenie gleby. W celu ułatwienia interpretacji i porównywania uzyskanych wyników LCA możliwe jest przeprowadzenie normalizacji wskaźnika kategorii wpływu. Wówczas wyniki charakteryzowania dzieli się przez wartość odniesienia, którą w oprogramowaniu EASETECH jest uśredniona roczna wielkość wpływu jakiegoś czynnika przypadająca na jednego mieszkańca Europy (the person equivalent, PE).

#### **2.3.4. Interpretacja wyników LCA w programie EASETECH**

Interpretacja wyników jest ostatnią fazą analizy LCA. Powinna ona umożliwić identyfikację znaczących kwestii środowiskowych i ich ocenę, wykonaną w oparciu o stosowne analizy statystyczne. Następnie należy opracować sprawozdanie zawierające, między innymi, rekomendacje w obszarze zmniejszania negatywnych skutków środowiskowych związanych z analizowanym systemem gospodarki odpadami.

Program EASETECH, celem właściwej interpretacji uzyskanych wyników, umożliwia przeprowadzenie szeregu analiz statystycznych, w tym analizy wrażliwości i niepewności. Tym samym ułatwia zarówno identyfikację zmiennych, które mają kluczowy wpływ na wynik analizy LCA, jak również oszacowanie niepewności związanych z otrzymanym wynikiem. Źródłem niepewności w przypadku modelowania systemów gospodarki odpadami mogą być pozyskane/przyjęte dane (ich kompletność i jakość) oraz obrane granice systemu i związane z nim procesy jednostkowe.

### **3. Wnioski**

Metodyka prowadzenia badań techniką oceny cyklu życia (LCA) zintegrowanych systemów gospodarki odpadami jest ciągle na etapie rozwoju. Zgodnie z koncepcją zrównoważonego rozwoju, do oceny cyklu życia włącza się również aspekty ekonomiczne (life cycle cost, LCC) oraz uwarunkowania społeczne (social life cycle assessment, SLCA). Wraz z rozbudowywaniem analizy LCA będzie rosła potrzeba właściwego doboru narzędzi do jej prowadzenia. Można przypuszczać, iż pomimo wielu trudności związanych z zebraniem stosownych danych i złożoności procedur metodologicznych, już w niedalekiej przyszłości, zgodnie z rekomendacją Unii Europejskiej (The European Environment Agency, EEA), LCA stanie się wiodącą techniką zarządzania.

WYNIKI PRZEDSTAWIONE W PUBLIKACJI ZOSTAŁY UZYSKANE W TRAKCIE BADAŃ SFINANSOWANYCH W RAMACH PROJEKTU "PERSPEKTYWY RSI ŚWIĘTOKRZYSKIE – IV ETAP" NR: WND – POKL.08.02.02 – 26 – 001/12 - PROGRAM OPERACYJNY KAPITAŁ LUDZKI, PRIORYTET VIII, DZIAŁANIE 8.2 TRANSFER WIEDZY, PODDZIAŁANIE 8.2.2 REGIONALNE STRATEGIE INNOWACJI.

### **Literatura**

Bernstad A., Aspegren H., Bissmont M., la Cour Jansen J., *Modern Solid Waste Management in Practice: The City of Malmö Experience*, Wyd. Springer 2013.

Clavreul J., *LCA of waste management systems: Development of tools for modelling and uncertainty analysis*, Wyd. Duński Uniwersytet Techniczny, Kopenhaga 2013.

Clavreul J., Baumeister H., Christensen T.H., Damgaard A., *An environmental assessment system for environmental technologies – Supporting Information*, "Environmental Modelling and Software" 2014, nr 60 (18-30).

Damgaard A., *Materiały szkoleniowe EASETECH*, Wyd. Duński Uniwersytet Techniczny, Kopenhaga 2014.

Kaczmarek B., Gierulski W.: *Designing Innovative Products in Terms of LCA*, "Structure and Environment, Architecture, Civil Engineering, Environmental and Energy" 2014, No. 2/2014, vol. 6 (48-55).

Kraszewski A., Pietrzyk-Sokulska E. (red.), *Ocena systemu gospodarki odpadami*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2011.

Laurent A., Clavreul J., Bernstad A., Bakas I., Niero M., Gentil E., Christensen T. H., Hauschild M. Z., *Review of LCA studies of solid waste management systems – Part II:*

*Methodological guidance for a better practice*, "Waste Management" 2014, nr 34 (589-606).

PN-EN ISO 14040:2009 *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura*.

Rybczewska-Błażejowska M., *Ocena cyklu życia (LCA) a efektywne gospodarowanie odpadami w regionie*, red. B. Bartniczak, Wyd. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Wrocławskiego, Jelenia Góra 2014.

Schluchter W., Rybczewska-Błażejowska M., *Life cycle sustainability assessment of municipal waste management systems*, "Management", Wyd. Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 2012.

Tukker A., *Handbook on Life Cycle Assessment*, Wyd. Kluwer Academic Publishers, New York Boston Dordrecht London Moscow 2002.

Zarebska J., *Recykling jako źródło surowców wtórnych*, [w:] *Zrównoważona produkcja i konsumpcja surowców mineralnych*, red. J. Kulczycka, E. Pietrzyk-Sokulska H. Wirth, Wyd. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 2011.

## **Abstrakt**

Przedmiotem niniejszego opracowania jest analiza narzędzi oceny cyklu życia (LCA) wspomagających modelowanie systemów gospodarki odpadami. Z uwagi na złożoność analiz prowadzonych w oparciu o LCA stosuje się w tym celu odpowiednie programy komputerowe. Można je podzielić na te o charakterze ogólnym, np. SimaPro oraz dedykowane zarządzaniu odpadami, np. EASETECH. Narzędzie EASETECH (Environmental Assessment System for Environmental Technologies) opracowane zostało przez grupę badawczą Uniwersytetu Technicznego w Kopenhadze. Posiada ono wiele atrybutów predysponujących je do prowadzenia kompleksowych analiz LCA zintegrowanych systemów gospodarki odpadami. Do najważniejszych zaliczyć należy możliwość modelowania niejednorodnego strumienia materiałów, jakim są odpady, rozbudowaną bazę danych procesów oraz bibliotekę kategorii wpływów i metod LCIA.

**Słowa kluczowe:** ocena cyklu życia (LCA), odpady, EASETECH