

# ZASTOSOWANIE TECHNIKI LCA W EKOLOGICZNEJ OCENIE PRODUKTÓW, TECHNOLOGII I GOSPODARCE ODPADAMI

## Streszczenie

Wśród wielu narzędzi zarządzania środowiskiem tj. EMAS, ISO 14001, Green Chemistry na uwagę zasługuje technika LCA (ang. *Life Cycle Assessment* - ocena cyklu życia). Jest ona rozwijana i popularyzowana od końca lat 90-ych XX wieku i odgrywa coraz większe znaczenie w ocenie ekologicznej technologii, produktów czy usług. Technika ta została wsparta określonymi procedurami opisanymi w normach ISO 14040 i 14044. Przy analizie LCA wykorzystuje się różne programy i modele komputerowe takie jak Sima Pro, GaBi, czy Umberto. Uważa się, że LCA jest jedną z najbardziej obiektywnych i dokładnych metod oceny środowiskowej z uwagi na jej wieloaspektowość oraz kompleksowość. Zastosowanie LCA w ocenie technologii produkcji czy systemach gospodarki odpadami jest niezbędne w celu określenia rzeczywistego wpływu różnych rozwiązań na środowisko i w konsekwencji wyboru najmniej uciążliwego dla środowiska.

## 1. Wprowadzenie

Wszystkie wytwarzane produkty lub realizowane usługi w mniejszym lub większym stopniu oddziałują na środowisko. Natężenie oddziaływania zależy od wielu czynników m.in. od długości użytkowania produktów, środków użytych przy produkcji (np. energia, woda) czy użytych materiałów (surowców). Obecnie pożądanym jest dążenie do zminimalizowania oddziaływania produktu czy usługi na środowisko we wszystkich fazach jego „życia”, a zwłaszcza w tych, w których to oddziaływanie jest największe. Takie podejście oprócz zysków środowiskowych może prowadzić także do redukcji kosztów wytwarzania, użytkowania i unieszkodliwiania produktów co może rzutować na poprawę konkurencyjności przedsiębiorstwa. Jedną z technik pozwalających na kompleksową ocenę wpływu na środowisko wytwarzanych produktów jest LCA (ang. *Life Cycle Assessment* - ocena cyklu życia). W polityce ekologicznej UE myślenie w kategoriach cyklu życia znajduje zastosowanie przy:

- promowaniu rozwoju rynku produktów i procesów przyjaznych dla środowiska (tzw. Zintegrowana Polityka Produktowa),

- zamówieniach publicznych,
- znakowaniu ekologicznym,
- ocenach technologii środowiskowych,
- gospodarce odpadami [1,2].

## 2. Historia techniki LCA

Jedną z pierwszych publikacji, która była typową oceną cyklu życia, w tym przypadku zużycia energii w systemach produkcyjnych, był raport zaprezentowany przez Harolda Smitha na Światowej Konferencji Energetycznej w 1963 roku [3]. W kolejnych latach rozpoczęto badania o zasięgu globalnym, które miały za zadanie prognozowanie zmian w podaży zasobów paliw kopalnych na kolejne lata poprzez oszacowanie zmian w popycie na surowce naturalne oraz energię. W Stanach Zjednoczonych rozwinięto model REPA (ang. *Resource and Environment Profile Analysis*), który umożliwiał dokonanie porównań zużytych ilości materiałów, energii i wytwarzanych odpadów na podstawie ich ilościowego zestawienia [4].

Właściwe początki prac nad LCA związane są z powołaniem pozarządowego stowarzyszenia pod nazwą SETAC (ang. *The Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) w 1978 roku. W następnych latach wyodrębniły się dwie szkoły LCA, amerykańska i europejska, które miały ogromny wpływ na prowadzenie badań w tej tematyce przez wiele lat [5]. W 2004 roku utworzono odłam organizacji SETAC, działający w krajach Europy Środkowo – Wschodniej (SETAC CEE). Na dzień dzisiejszy jej członkami są głównie przedstawiciele nauki. Zadaniem SETAC CEE jest między innymi promowanie i popularyzowanie LCA.

Pierwszą, powszechnie akceptowaną strukturę techniczną (procedurę) LCA opublikowano w 1993 roku w dokumencie „*A Code of Practice*”. Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna ISO w połowie lat 90-tych podjęła pracę nad normalizacją obszaru LCA i w efekcie powstała grupa norm ISO serii 1404x [6,7]. Na ich podstawie zostały przygotowane polskie wersje językowe dokumentów. Obecnie w Polsce obowiązującymi są następujące normy:

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

W normach tych opisano zasady i strukturę oceny cyklu życia (LCA) oraz podano wymagania i procedury niezbędne do oceny cyklu życia.

Badania nad oceną cyklu życia są również prowadzone w ramach UNEP (ang. *The United Nations Environment Programme*), jednak na największą uwagę zasługują prace określane mianem *Life Cycle Initiative* stanowiące wynik pracy obu organizacji SETAC i UNEP [8].

Wzorem państw Europy zachodniej również w Polsce powstaje coraz więcej ośrodków zaangażowanych w badania LCA np. Politechnika Poznańska, Politechnika Wrocławska, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie, Główny Instytut Górnictwa w Katowicach. Badania LCA coraz częściej wynikają ze współpracy z konkretnymi firmami i mają charakter typowo praktyczny.

## 3. Struktura LCA

LCA jest jedną z kilku technik zarządzania środowiskiem, która znajduje zastosowanie m.in. w badaniu aspektów środowiskowych i potencjalnych oddziaływań w całym okresie życia produktu czy procesu tj. „*od kołyski aż do grobu*”, począwszy od wydobycia surowców, poprzez wytworzenie, dystrybucję, użycie, ponowne wykorzystanie. Technika LCA umożliwia ocenę aspektów i wpływów środowiskowych, które wynikają z poszczególnych etapów życia wyrobu, obejmujących:

- wydobywanie i przetwarzanie surowców mineralnych,
- wytwarzanie (proces produkcji),
- dystrybucję,
- transport,
- użytkowanie,
- powtórne użycie,
- recykling,
- ostateczne unieszkodliwianie odpadów.

Międzynarodowa Organizacja ds. Standaryzacji ISO (z ang. – *International Standard Organization*) definiuje LCA jako technikę oceny aspektów środowiskowych i potencjalnych wpływów związanych z wyrobem, która obejmuje cztery fazy:

- określenie celu i zakresu badań,
- inwentaryzację zbioru istotnych wejść i wyjść w systemie wyrobu,
- ocenę potencjalnych wpływów na środowisko związanych z wejściami i wyjściami systemu,
- interpretację rezultatów analizy zbioru oraz faz oceny wpływu w odniesieniu do celów badań [6,7].

Ocena cyklu życia może być traktowana jako narzędzie wspomagające przy podjęciu decyzji, która pomoże w wyborze najkorzystniejszej drogi projektowania nowych wyrobów czy technologii, jak i rozwoju już istniejących. Całość oceny cyklu życia odnosi się do modelowego systemu, który stanowią połączone ze sobą procesy jednostkowe spełniające jedną lub kilka określonych funkcji. Procesy te stanowią zbiór, w którym następują przepływy materiałowo–energetyczne między procesami jednostkowymi. Dlatego niezbędne jest gromadzenie danych o zużywanej energii czy surowcu na każdym etapie cyklu życia danego wyrobu [9].

LCA jest techniką, która obrazuje złożone interakcje jakie występują pomiędzy wyrobem a środowiskiem, przy czym główne kategorie wpływu na środowisko wymagają również rozważenia skutków dla zdrowia ludzkiego, wykorzystania zasobów naturalnych oraz wpływu na jakość ekosystemu. Do podstawowych zadań LCA należy:

- dokumentowanie potencjalnych wpływów wyrobu na środowisko podczas wszystkich etapów jego życia,
- analiza możliwości wystąpienia wzajemnie powiązanych wpływów środowiskowych, tak aby zastosowane środki zaradcze nie powodowały powstawania nowych problemów środowiskowych (np. transfer zanieczyszczeń),
- ustalenie priorytetów w doskonaleniu produkcji wyrobów,
- umożliwienie porównywania różnych rozwiązań takiego samego problemu lub różnych sposobów realizowania takiego samego procesu [9].

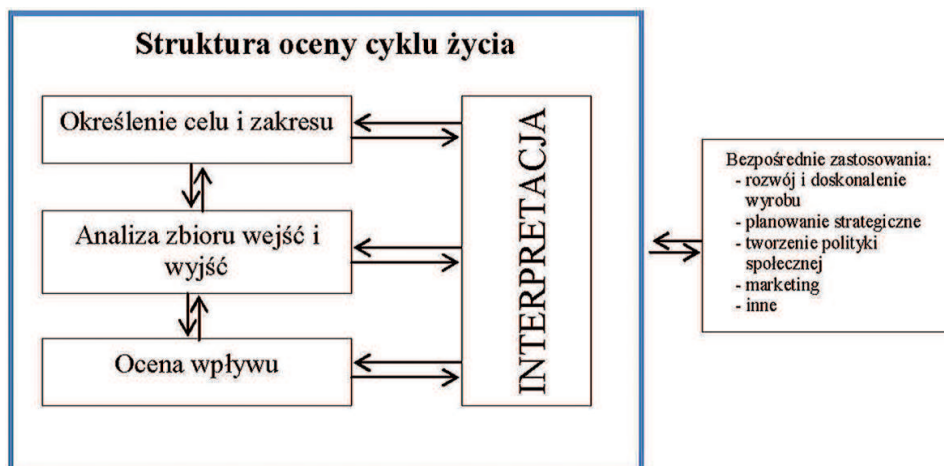
Dzięki wynikom zdobywanym na podstawie analiz LCA, możliwe jest określenie najbardziej przyjaznego systemu produkcji wyrobu, który jest najkorzystniejszy dla środowiska. Analizę wpływu wyrobu rozpoczyna się już od etapu projektowania wyrobu, co ma zagwarantować obiektywność i określenie wszystkich oddziaływań [9]. Etap ten stanowi punkt krytyczny dla każdego przedsięwzięcia czy produktu, ponieważ w tym momencie wybierane są rodzaje surowców i materiałów bazowych oraz sposób ich użycia, a więc czynniki określające stopień wykorzystania zasobów naturalnych. Na etapie projektowania określa się również czas życia produktu, łatwość jego naprawy, demontażu i ponownego użycia.

LCA dodatkowo może dobrze identyfikować w systemie produkcji tzw. transfer oddziaływania na środowisko czyli sposób przemieszczania się zanieczyszczeń z jednego komponentu środowiska do innego (np. eliminując emisję do powietrza, powoduje się wzrost ilości ścieków) lub z jednej fazy cyklu życia produktu na inną (np. z użycia i powtórnego użycia pro-

duktu na fazę pozyskania surowców do produkcji). W przypadku braku takiej analizy cyklu życia transfer oddziaływania na środowisko mógłby zostać pominięty co mogłoby wpłynąć na decyzję co do wyboru odpowiedniego systemu produkcji [9].

### 3. Etapy LCA – metodyka badań

W strukturze LCA wyróżnia się kilka ważnych etapów oceny. Poszczególne fazy techniki LCA przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Fazy oceny cyklu życia (LCA) wraz z obszarem zastosowań [6].

Etap pierwszy LCA, czyli określenie celu i zakresu, stanowi kluczowe stadium analizy, bowiem z jednej strony warunkuje wybór techniki, z drugiej zaś determinuje jej szczegółowość. Określenie granic badanego modelu i wybór parametrów jakościowo-ilościowych zależy od założonego celu oraz planowanego sposobu wykorzystania wyników. [6,7]. Istotnym elementem każdej analizy LCA jest określenie celu badania i grupy docelowej, której będą przedstawiane jej wyniki. Należy mieć zawsze na uwadze fakt iż LCA to narzędzie wspomagające decyzje, a w proces decyzyjny zaangażowane są tzw. zainteresowane strony. Norma ISO 14040 charakteryzuje je jako „jednostki lub grupy związane z efektami działalności środowiskowej systemu wyrobu albo wynikami oceny cyklu życia lub nimi dotknięte” [6]. Według normy „cel powinien jednoznacznie ustalać zamierzone zastosowanie, powody prowadzenia badań i zamierzonego odbiorcę, tj. komu zamierza się komunikować wyniki badań” [10].

Pierwszy etap analizy cyklu życia LCA obejmuje ustanowienie i uzasadnienie doboru celu, zamierzone użycie wyników LCA, jak również opis zleceniodawcy i wykonującego badania, docelowych odbiorców. Poza określeniem przyczyn podjęcia analizy metodą LCA, należy określić typ tej analizy, ponieważ można wykonywać analizę porównawczą oraz nieporównawczą. Obecnie cel i zastosowanie wyników stanowią główne determinanty struktury oceny cyklu życia, jednak, jak wcześniej wspomniano, być może w przyszłości będzie funkcjonowała pewna uniwersalna forma analizy LCA, oparta na wspólnej metodologii.

Zakres badań określany jest głównie poprzez scharakteryzowanie zakresu i typu gromadzonych danych oraz granic systemu. W tym momencie określa się, które etapy cyklu życia zostaną objęte badaniem (szerokość systemu) oraz poziom zaawansowania (głębokości) systemu. Podczas tego etapu określa się zakres geograficzny, czasowy i technologiczny badania LCA i należy również wskazać rodzaje wpływów środowiskowych jak również metodykę ich oszacowania, dzięki czemu uzyskujemy podstawy do klasyfikowania i charakteryzowania [11].

Podczas określania zakresu badań istotne jest scharakteryzowanie trzech bardzo ważnych, powiązanych ze sobą zagadnień:



**1. system wyrobu stanowi zbiór** „materialowo i energetycznie połączonych procesów jednostkowych, które spełniają jedną lub więcej określonych funkcji” [6,7,12]. Procesy jednostkowe są ze sobą powiązane strumieniami wyrobów. Opis procesu jednostkowego określa:

- elementarne strumienie wejściowe (np. woda, ropa naftowa) i wyjściowe (np. emisje do powietrza), strumienie wyrobów pośrednich (surowców) oraz strumienie wyrobów (np. rury miedziane, energia elektryczna),
- początek procesu jednostkowego, tzn. miejsce przyjęcia surowca lub wyrobu pośredniego,
- rodzaj przemian oraz operacji zachodzących w ramach rozpatrywanego procesu jednostkowego,
- koniec procesu jednostkowego, tzn. miejsce odbioru wyrobu lub wyrobu pośredniego.

**2. wyznaczenie granicy systemu wyrobu** czyli „obszaru styku pomiędzy systemem wyrobu i środowiskiem lub systemami innych wyrobów” [12]. Etap polega na wyznaczeniu przedziału czasowego, obszaru geograficznego i technologicznego. Określona zostaje również dokładność i kompletność danych. Określenie obszaru systemu i jego granic ma na celu ustalenie źródła surowców i energii stosowanej w poszczególnych fazach procesu. W celu ustalenia granicy systemu należy jednoznacznie określić procesy jednostkowe oraz rozważyć kilka jednostkowych etapów cyklu życia [12]. W tym celu bierze się pod uwagę m.in.

- wejścia i wyjścia w procesie wytwarzania lub przetwarzania,
- dystrybucję i transport,
- produkcję i wykorzystanie wszelkiego rodzaju paliw i energii,
- wykorzystanie i konserwację wyrobów,
- wykorzystanie odpadów technologicznych i surowców wtórnych,
- wytwarzanie materiałów pomocniczych,
- wytwarzanie, prawidłowe użytkowanie oraz likwidację wyposażenia podstawowego, niezbędnego do prawidłowego funkcjonowania maszyn i urządzeń wykorzystywanych w procesie wytwórstwa,
- aspekty związane z dodatkowymi urządzeniami czy instalacjami tj. oświetlenie czy ogrzewanie,

**3. zdefiniowanie jednostki funkcjonalnej** czyli „ilościowego efektu systemu wyrobu stosowanego jako jednostka odniesienia w badaniach LCA”. Jednostka funkcjonalna odnosi się do całego systemu wyrobu i należy ją postrzegać przez pryzmat właściwości użytkowych wyrobu i spełnianych przez niego funkcji. Oceniając produkt należy odnieść się ilościowo do tej jednostki (parametru) np. 1 m<sup>2</sup> pomalowanej powierzchni (farba), 1 MW uzyskanej czy zużytej energii, itp.

#### 4. Metody i narzędzia komputerowe w badaniach LCA

Istnieje kilka uznanych metod oceny wpływu cyklu życia, opracowanych w ośrodkach europejskich i odnoszących dane do warunków średnich w Europie np. EPS 2000, CML, *Eco-indicator 99*, *IMPACT 2002+*, *ReCiPe*, *MIPS*. Są one zaimplementowane do programów komputerowych wykorzystywanych przy technice LCA, np. SimaPro, GaBi, Umberto. W ocenie LCA systemów gospodarki odpadami wykorzystuje się następujące programy: IWM (*Integrated Solid Waste Management tool*), ORWARE (*Organic Waste Research*), LCA- IWM (*Life Cycle Assessment- Integrated Waste Management*), WISARD (*Waste-Integrated Systems for Assessment of Recovery and Disposal*).

Na podstawie wyników, które są efektem obliczeń komputerowych przy określonych założeniach jest możliwe oszacowanie wpływu na środowisko wybranych produktów lub pro-

cesów produkcyjnych. Poprzez porównanie uzyskanych rezultatów możliwe jest wskazanie produktu lub procesu produkcyjnego, który będzie miał najmniej negatywny wpływ na środowisko.

Stosując techniki komputerowe, powinno się uwzględniać uwarunkowania naukowo-techniczne związane z fizykochemicznym charakterem przebiegu procesów, a także zapewniać elastyczne zarządzanie bazą danych i możliwość rozszerzania modelowanych opcji interpretacyjnych. Problematykę LCA wspomaga obecnie ponad czterdzieści komercyjnych wersji programów. Poniżej przedstawiono opis wybranych metod i programów komputerowych wykorzystywanych w praktyce.

#### 4.1. Eco-indicator 99

Metoda Eco-indicator 99, którą opracowano bazując na wcześniejszej metodzie Eco-indicator 95, stosuje podejście ukierunkowane na ocenę w punktach końcowych. Metoda ta polega na modelowaniu wpływu środowiskowego na poziomie punktów końcowych mechanizmu środowiskowego. Proces charakteryzowania prowadzony jest dla 11 kategorii wpływu, które są przypisane do trzech większych grup zwanych kategoriami szkody.

- szkód na **zdrowiu ludzkim**, wyrażanym jako liczba zgonów i lat życia w inwalidztwie (jednostką jest DALY – lata życia dotknięte niepełnosprawnością). Model szkód opracowano na podstawie kategorii wpływu: czynniki rakotwórcze, wpływ związków organicznych i nieorganicznych na układ oddechowy, zmiany klimatu oraz zubożenie warstwy ozonowej,
- szkód pogarszających **jakościowej ekosystemu**, wyrażanych jako zanikanie określonych gatunków na określonym terenie i w określonym czasie (jednostką jest  $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rok}$  – część gatunków potencjalnie zagrożona). W modelu uwzględniono kategorie takie jak: ekotoksyczność, zakwaszanie/eutrofizacja, zagospodarowanie terenu (obejmujące zajęcie terenu jak również jego przekształcenie),
- szkód odniesionych do **zużycia zasobów** surowcowych, wyrażanych jako dodatkowa ilość energii niezbędna do przyszłego wydobycia surowców mineralnych i paliw stałych (jednostką jest nadwyżka energii wyrażona w MJ), a model opracowano na podstawie zużycia surowców mineralnych i paliw kopalnych.

Wyniki wskaźników kategorii szkody podlegają dalszej analizie w drodze normalizacji, ważenia i grupowania w końcowy ekowskaźnik.

#### 4.2. Metoda CML

Metodyka jest typowym przykładem metody punktów pośrednich. Metoda CML 2 dzieli kategorie wpływu na trzy grupy [12]:

- obowiązkowe kategorie wpływu używane w większości analiz,
- dodatkowe kategorie wpływu mające określone parametry charakteryzowania, jednak często nie są uwzględniane w analizach LCA,
- inne kategorie wpływu, które nie mają opracowanych parametrów charakteryzowania niemożliwe jest więc włączenie ich do ilościowych analiz LCA.

Do wskaźników używanych w CML zaliczamy [12]:

- **Wskaźnik zubożenia zasobów abiotycznych ADP** (Abiotic Depletion Potential) – wskaźnik odnosi się do kategorii wpływu zubożenie zasobów abiotycznych związanej z ochroną poziomu życia, zdrowia ludzi i jakości ekosystemu. Parametr ten jest odnoszony do wydobycia surowców mineralnych i energetycznych wchodzących do systemu. ADP jest określany dla każdego rodzaju wydobycia kopalin i paliw stałych ( $\text{kg}$  równoważnika antymonu/ $\text{kg}$  metalu).
- **Potencjał globalnego ocieplenia GWP** (Global Warming Potential). Kategorią globalnego ocieplenia w metodzie CML są zmiany klimatu związane z emisją gazów cieplarnianych do atmosfery. Zmiany te wpływają na jakość ekosystemu, zdrowie ludzkie

i poziom dobrobytu. Potencjał globalnego ocieplenia GWP jest tutaj parametrem charakteryzowania, natomiast wskaźniki GWP100 są obliczane dla okresu stuletniego i wyrażane w kg równoważnika ditlenku węgla na kg emisji w skali naszego globu.

- **Wskaźnik zmniejszania zasobów ozonu stratosferycznego ODP** Parametrem charakteryzowania w ramach kategorii zubożenie warstwy ozonowej jest ODP (*Ozone Depletion Potential*). Ze względu na zmniejszanie się warstwy ozonu w stratosferze większe ilości promieniowania ultrafioletowego osiągają powierzchnię Ziemi co ma negatywny wpływ na zdrowie ludzi, zwierząt, ekosystemy lądowe i wodne, cykle biochemiczne i materiały.
- **Potencjał toksyczności dla gleb** (*Terrestrial EcoToxicity Potential*). Parametr dotyczący wpływu substancji toksycznych na ekosystemy glebowe.
- **Wskaźnik zakwaszenia AP** (*Acidification Potential*). Substancje kwaśne wpływają w różny sposób na glebę, wody gruntowe i powierzchniowe, organizmy, ekosystemy i materiały (budowlane). Parametr charakteryzowania w ramach kategorii wpływu zakwaszenie jest potencjał zakwaszenia AP.
- **Potencjał eutrofizacji EP** (*Eutrophication Potential*).
- **Potencjał odczuwalności zapachów OTV** (*Odour Threshold Value*).

#### 4.3. Metoda EPS 2000

Metoda EPS 2000 stosowana jest głównie w procesach rozwoju produktów wewnątrz firmy. Jest opracowana w ten sposób aby umożliwić porównanie wpływu na środowisko dwóch produktów. W metodzie EPS 2000 przyjęte dane oraz modele są ukierunkowane na zmniejszenie oddziaływania produktu na środowisko.

W metodzie EPS 2000 standard określono kategorie wpływu dla pięciu grup zagadnień [12]:

- zdrowie ludzkie,
- zdolność produkcyjna ekosystemu,
- zasoby surowców abiotycznych,
- bioróżnorodność,
- wartości społeczne i rekreacyjne.

Dla szkód dotyczących zdrowia ludzkiego stosowane są wskaźniki tj.

- oczekiwany czas życia ważony w utraconych latach życia (lata na osobę),
- poważne choroby i cierpienia (w latach na osobę), włącznie z głodem,
- choroby (w latach na osobę), jak przeziębienia czy grypa,
- poważne niedogodności (w latach na osobę), które zazwyczaj powodują reakcję mającą na celu ich uniknięcie,

Dla szkód dotyczących zdolności produkcyjnej ekosystemu stosowane są następujące wskaźniki [3,12]:

- zdolność produkcji zbóż,
- zdolność produkcji drewna,
- zdolność produkcji ryb i mięsa,
- zdolność produkcji podstawowych kationów,
- zdolność produkcji wody (nawadniającej),
- zdolność produkcji wody pitnej.

Wskaźniki zasobów abiotycznych związane są ze zmniejszaniem zasobów kopalin surowców mineralnych oraz paliw. Wskaźnikiem bioróżnorodności jest m.in. stopień zaniku gatunków.

#### 4.4. Program Umberto

Program Umberto, zależnie od wersji, jest przeznaczony dla jednostek oferujących opracowanie LCA lub przeprowadzających LCA na wewnętrzne potrzeby organizacji. Omawiany pakiet oprogramowania umożliwia realizację szerokiego zakresu prac m.in.:

- analizę przepływu energii i materiałów w odniesieniu do firm, instalacji produkcyjnej lub obiektów,
- kalkulację kosztów operacyjnych i cyklu życia,
- optymalizację środowiskową przepływu energii i materiałów,
- wybór ekologicznie optymalnej wersji produktu,
- tworzenie i optymalizowanie raportów środowiskowych,
- opracowanie ilościowej bazy dla systemu zarządzania środowiskowego.

Aplikacje programu Umberto są możliwe dzięki wyposażeniu go w zestaw specjalistycznych narzędzi, do których należą:

- graficzna edycja sieci do modelowania przepływu materiału, m.in. w postaci wykresów Sankeya,
- administrowanie materiałem,
- inwentarz wejścia i wyjścia,
- inspekcja inwentarza w celu graficznego przedstawienia analizy danych,
- edytor systemu wartościowania dla tworzenia własnego systemu oceny,
- panel kontrolny – monitor wejścia, umożliwiający ocenę własnego scenariusza w przypadku prowadzenia badań modelowych,
- interfejs zewnętrznych baz danych i biblioteka do administrowania danymi [3,12].

#### 4.5. Program SimaPro

W programie SimaPro wykorzystywana jest metoda ekowskaźnika (*eco-indicator*), jednak miejsce strat zajmują szkody wywoływane w środowisku przez niekorzystne oddziaływanie procesu lub wyrobu. Ocenę szkód przeprowadza się poprzez oszacowanie obciążeń przypisanym poszczególnym kategoriom oddziaływań. Ze względu na chęć zmniejszenia ilości oddziaływań, a także aby wykorzystać łatwe do interpretacji oddziaływanie, zdefiniowano środowisko jako: zestaw biologicznych, fizycznych i chemicznych parametrów, stanowiących warunki funkcjonowania człowieka i przyrody, na które oddziałuje człowiek. Warunki te obejmują zdrowie ludzkie, jakość ekosystemu i zasoby surowców naturalnych [3,12].

W ramach kategorii zdrowie ludzkie występują takie czynniki, jak liczba i czas trwania chorób, przedwczesne zgony spowodowane oddziaływaniem środowiskowym, oraz efekty: zmiana klimatu, zubożenie warstwy ozonowej, działania nowotworowe, wpływ radiacji, utrudnione procesy oddechowe.

Kategoria jakość ekosystemu zawiera wpływ na różnorodność gatunków, zwłaszcza roślin naczyniowych i niższych, a także następujące efekty: ekotoksyczność, zakwaszenie, eutrofizację i eksploatację ziemi.

Kategoria zasoby surowców naturalnych obejmuje nadwyżkę energii, która stanowi energię potrzebną w przyszłości do wydobycia minerałów i surowców kopalnianych gorszej jakości, natomiast zubożenie surowców budowlanych, takich jak żwir i piasek, jest traktowane jako eksploatacja ziemi. Tak zdefiniowane kategorie w istotnym zakresie odpowiadają kategoriom oddziaływań stosowanym w ekobilansach, chociaż nie uwzględniają hałasu, jak również niektórych rodzajów wpływu metali ciężkich [3,12].

Standardowe ekowskaźniki opracowano dla materiałów, procesów produkcyjnych, transportowych, energetycznych i zagospodarowania odpadów. Obliczając ekowskaźniki dla poszczególnych procesów, uwzględniano wszystkie składowe. W odniesieniu do wytwarzanych materiałów brano pod uwagę cykl od wydobycia surowców do gotowego materiału. W przypadku procesów produkcyjnych uwzględnia się emisje z procesów wraz z emisjami powstałymi z wytwarzania energii [3,12].

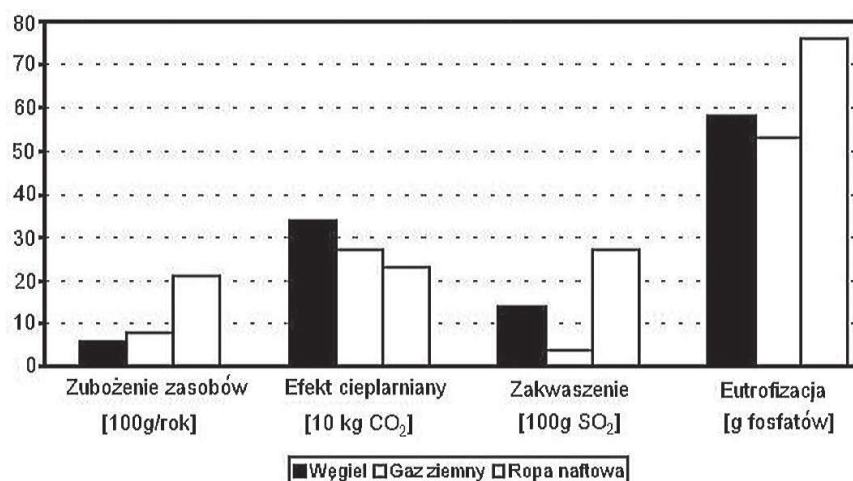


## 5. Przykłady ocen środowiskowych techniką LCA dla procesów produkcyjnych oraz w gospodarce odpadami

### 5.1. LCA dla źródeł energii

Produkcja energii cieplnej i elektrycznej ze źródeł nieodnawialnych jest główną przyczyną zanieczyszczenia środowiska. W Polsce źródła energetyczne odpowiadają za ponad 50% emisji zanieczyszczeń do powietrza. Zatem uzasadnione jest prowadzenie badań LCA, które wskażą wpływ poszczególnych źródeł na takie niekorzystne efekty jak: efekt cieplarniany, zakwaszenie czy eutrofizacja.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki badań pełnej LCA źródeł energii cieplnej przy założeniu, że jednostką funkcjonalną czyli porównawczą jest wytworzenie 1 GJ energii [13].



**Rys. 2.** Wpływ poszczególnych źródeł energii na najważniejsze niekorzystne efekty środowiskowe [13].

Z danych przedstawionych na rysunku wynika, że w porównaniu z ropą naftową i gazem ziemnym, produkcja energii z węgla w stosunkowo niewielki sposób przyczynia się do zubożenia zasobów. Wynika to z faktu, że choć więcej węgla trzeba zużyć na uzyskanie 1 GJ energii to, w porównaniu z istniejącymi zasobami węgla, ilość ta jest relatywnie mała. Jednak pozyskiwanie energii z węgla wywiera największy wpływ na środowisko w ramach kategorii efektu cieplarnianego, jak również znacznie oddziałuje na eutrofizację.

Z tych trzech źródeł to ropa naftowa powoduje największy wpływ w kategorii eutrofizacji, zakwaszenia oraz zubożenia zasobów. Gaz ziemny w najmniejszym zakresie przyczynia się do zakwaszenia i eutrofizacji, natomiast większy wpływ jest wywierany w kategorii efektu cieplarnianego i zubożenia zasobów.

Na podstawie przeprowadzonych analiz można potwierdzić, że w porównaniu do pozostałych paliw kopalnych produkcja energii z gazu ziemnego jest najbardziej przyjazna środowisku.

Innym przykładem na badania LCA w sektorze energetycznym są analizy przeprowadzone w krajach europejskich, które dotyczyły wpływu wybranych procesów i operacji na środowisko, w których zużywa się energię z różnych źródeł tj.:

- transport (1 osoba/km),
- wytwarzanie energii cieplnej (1 GJ),
- wytwarzanie energia elektrycznej (1 GJ).

W badaniach porównano między innymi dwa rodzaje źródła energii cieplnej dostarczanej gospodarstwu domowemu tj. oleju opałowego i gazu ziemnego. Analizę przeprowadzono pod

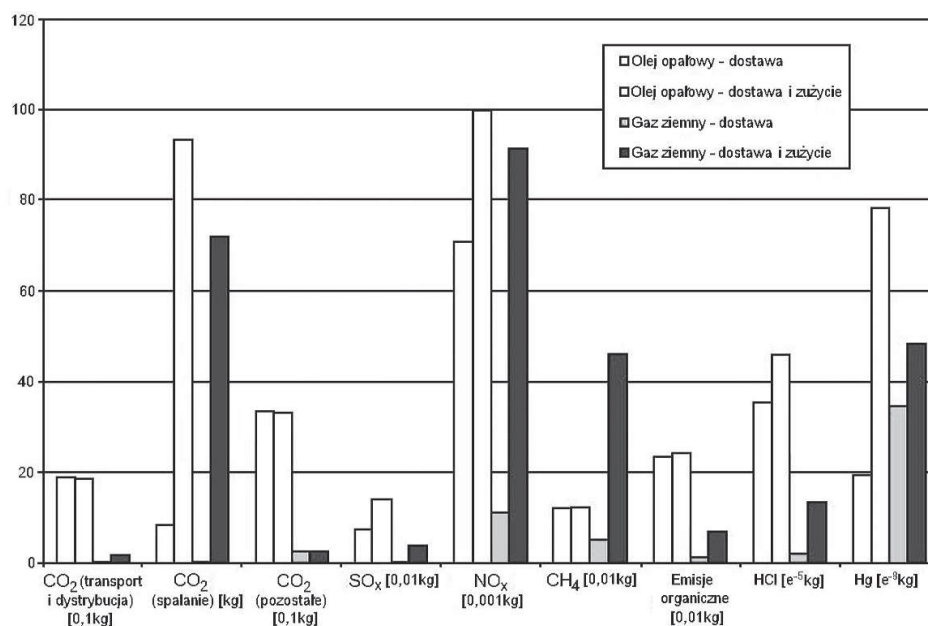
kątem najważniejszych kategorii wpływu czyli: zubożenie zasobów, efekt cieplarniany, zakwaszenie i eutrofizacja [3]. W tabeli 2 przedstawiono typ przypisanego wskaźnika do poszczególnych kategorii wpływu oraz zasięg geograficzny oraz efekt środowiskowy wpływu.

Efekty oddziaływania na środowisko były szacowane przy użyciu analizy metodą LCA zawierającej wszystkie fazy usługi jaką jest dostarczanie ciepła. Użyta jednostka funkcjonalna w analizie wpływu źródła energii cieplnej na obciążenie środowiska to dostarczenie 1 GJ energii cieplnej gospodarstwu domowym [3]. Analiza porównawcza dotyczyła zarówno etapu dostawy paliwa do odbiorcy oraz pełnej analizy cyklu życia (dostawa wraz z wykorzystaniem energii cieplnej).

**Tabela 1.** Kategorie wpływu na środowisko.

Kategoria wpływu	Zasięg geograficzny	Efekt środowiskowy	Przypisany wskaźnik
Zubożenie zasobów	Globalny	Zubożenie nieodnawialnych zasobów	1/statystyczny okres życia substancji (w latach)
Efekt cieplarniany	Globalny	Wpływ na globalny klimat	1 kg CO <sub>2</sub>
Zakwaszenie	Regionalny	Niszczenie lasów, kwaśne deszcze	1 kg SO <sub>2</sub>
Eutrofizacja	Globalny	Nadmierny wzrost alg w wodnych ekosystemach	1 kg PO <sub>4</sub>

Na rysunku 3 przedstawiono wpływ na środowisko dostaw i zużycia gazu i oleju opałowego na wielkość emisji zanieczyszczeń (do powietrza i wody) i wytwarzanie odpadów.



**Rys. 3.** Dostawa i zużycie paliw – emisje do powietrza przypadające na wytworzenie 1 GJ energii cieplnej [3].

Obliczone emisje CO<sub>2</sub> przy dostawach oraz dostawach i zużyciu dla oleju opałowego są wyższe niż dla gazu. Ten sam efekt można zaobserwować dla SO<sub>x</sub>, związków organicznych, HCl oraz rtęci.

## 5.2. Zastosowanie LCA w ocenie ekologicznej paliw

Jednym z przykładów zastosowania LCA jest porównanie w całym cyklu życia nowych paliw silnikowych opartych na upłynnieniu biomasy (nazwa SunDiesel) z tradycyjnym olejem napę-

dowym. Analizy dokonała firma PEEurope GmbH na zlecenie Volkswagen i DaimlerChrysler zgodnie z normą EN ISO 14040. Studium wykazało, że SunDiesel może przyczynić się do znacznego ograniczenia emisji zanieczyszczeń przede wszystkim CO<sub>2</sub>. W zakresie oddziaływań środowiskowych, zakwaszenia i eutrofizacji ustalono warunki transportu i dostaw surowców, które powodują mniejsze oddziaływania niż w przypadku konwencjonalnego oleju napędowego. W efekcie tych analiz wybudowano i uruchomiono linię pilotażową, a kolejnym etapem jest uruchomienie instalacji o wydajności 200 tys. ton na rok [2].

### 5.3. LCA w ocenie ekologicznej wodomierzy przemysłowych

W Polsce dobrym przykładem zastosowania techniki LCA jest analiza cyklu życia wodomierzy przemysłowych. Po zebraniu pełnych informacji na temat produkcji wodomierzy oraz przyjęciu pewnych założeń np. określenie transportu wodomierzy sporządzono tabele bilansowo, które są zestawieniem wielkości zużywanych surowców oraz emisji związanych z produkcją i użytkowaniem wodomierzy. Analizę przeprowadzono dla różnych typów wodomierzy wykorzystując metodę Eco-indicator 99. Na podstawie analiz LCA stwierdzono, że porównując wartości współczynników środowiskowych dla różnych typów wodomierzy oddziaływanie środowiskowe zmienia się w granicach ok. 25%. Na podstawie badań stwierdzono bardzo wysoki poziom oddziaływań związanych z chorobami układu oddechowego co jest związane z produkcją materiałów niezbędnych do wytwarzania wodomierzy (procesy hutnicze oraz spalanie węgla) [2].

### 5.4. LCA operacji suszenia

Innym przykładem jest zastosowanie LCA do analizy procesów inżynierii chemicznej na przykładzie procesu suszenia. Przy ocenie LCA zastosowano technikę MIPS (*ang - Material Input Service Unit*). MIPS jest to wskaźnik oparty na koncepcji tzw. bagażu ekologicznego poszczególnych materiałów, produktów i usług poprzez pryzmat ich zasobochłonności. Wynikiem analizy MIPS jest liczba agregująca wspomniane aspekty cyklu życia produktu, co umożliwia porównywanie kilku analizowanych produktów lub procesów w aspekcie środowiskowym.

W badaniach porównano dwa układy suszarnicze różniące się od siebie zarówno wydajnością jak i konstrukcją. Pierwszym analizowanym układem była suszarka laboratoryjna o wydajności 1 kg/h odparowanej wilgoci. Drugim układem była wysokowydajna (1 kg/s) wielkogabarytowa suszarka pracująca w jednym z zakładów przemysłowych. Przy założonych danych wejściowych i przyjętej jednostce funkcjonalnej ustalono, że system suszenia oparty na dużej suszarce jest ponad 30-krotnie mniej szkodliwym od systemów opartych na suszarkach laboratoryjnych [14].

### 5.5. LCA systemów gospodarki odpadami

Stosowanie LCA w gospodarce odpadami jest rekomendowane w wielu oficjalnych dokumentach UE m.in. w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE (z dnia 19 listopada 2008 roku). Zapisano w niej, że „... konieczne jest zaostrzenie przepisów dotyczących zapobiegania powstawania odpadów oraz wprowadzenie wymogu zobowiązującego państwa członkowskie do opracowywania programów zapobiegania powstawania odpadów, koncentrujących się na kluczowych elementach oddziaływania na środowisko oraz uwzględniających cały cykl życia produktów i materiałów” [15].

Ciekawym przykładem zastosowania LCA w ocenie systemu gospodarki odpadami jest wykonanie LCA dla rejonu Asti w północnych Włoszech. W obszarze tym ok. 50% odpadów zbieranych jest w sposób selektywny przy czym istotną część stanowią odpady organiczne. Badanie LCA miało na celu określenie kierunku zagospodarowania odpadów organicznych. Rezultat analiz LCA wykazał, że istniejący system gospodarki odpadami organicznymi, oparty na kompostowaniu jest bardziej prośrodowiskowy w porównaniu ze składowaniem [15,16].

Dobrym przykładem w Polsce stosowania LCA jest wykorzystanie tego narzędzia przy określeniu wpływu na środowisko systemu gospodarki odpadami dla woj. świętokrzyskiego w latach 2006-2008. Analizę systemu gospodarki odpadami metodą LCA przeprowadzono na podstawie wielu danych i informacji m.in.: liczby mieszkańców objętych odbiorem odpadów, ilości odpadów, składu morfologicznego odpadów, wyników selektywnej zbiórki odpadów, technologii odzysku i unieszkodliwiania odpadów. Jednostką funkcjonalną był cały system objęty granicami województwa.

Analiza LCA pozwoliła na określenie stopnia wpływu na środowisko systemu gospodarki odpadami w woj. Świętokrzyskim. Wyniki analizy wskazują na zmniejszenie się potencjalnego wpływu na środowisko w 2008 roku o 20% w porównaniu do 2006 roku [15].

### 5.6. LCA toreb wielokrotnego użytku

Interesującym przykładem oceny środowiskowej w obszarze opakowań jest analiza cyklu życia czterech rodzajów toreb wielokrotnego użycia:

- torba bawełniana z nadrukiem wyprodukowana w 2009 roku na zlecenie Ministerstwa Środowiska,
- torba z folii polietylenowej (PE-LD),
- torba z tkaniny polipropylenowej (PP),
- torba papierowa [17].

Przyjęto, że jednostką funkcjonalną służącą do efektywnego porównania różnych toreb będzie „przeniesienie 5 kg zakupów na odległość 500 m”. Cykl życia wszystkich toreb został podzielony na etapy z uwzględnieniem elementów, z jakich były one wykonane. Założone zostały również sposoby postępowania z torbami po zużyciu biorąc pod uwagę źródła pochodzenia surowców do produkcji toreb, realia polskich warunków odzysku i unieszkodliwiania odpadów opakowaniowych. Analiza LCA została wykonana przy użyciu programu SimaPro, który obecnie jest jednym z najlepszych narzędzi do przeprowadzania analiz LCA [17].

Jak wynika z przeprowadzonej oceny największy wpływ na środowisko jest związany z cyklem życia torby papierowej. Wysoka wartość jest efektem małej ilości rotacji takiej torby i wpływu na środowisko dużych obszarów leśnych potrzebnych do uzyskania masy celulozowej przy uwzględnieniu czasu wzrostu drzew nadających się do przerobu. Wpływ ten można znacznie zmniejszyć przez działania konsumentów polegające na zwiększeniu liczby rotacji. Badania dowiodły, że czterokrotne użycie torby papierowej wywołuje podobny wpływ jak dla torby bawełnianej przy jej użyciu 76 razy [17]. Oceniana torba bawełniana (rotacja 152) z uwagi na znaczną masę (gruba tkanina, wzmocnienia, zamek błyskawiczny, nici) w ocenie nie wypadła najlepiej, chociaż jej wpływ jest znacznie mniejszy niż papierowej. Wynika to z dużego wpływu na środowisko samej uprawy bawełny, dużej ilości wody potrzebnej do uprawy oraz środków ochrony roślin itp.

Z analizy LCA wynika, że torba z tkaniny polipropylenowej wypadła bardzo dobrze. Ta ocena jest wynikiem przyjętej, dosyć wysokiej 66-krotnej średniej ilości rotacji, która to wartość została ustalona na podstawie badań ankietowych. Podobnie, jak w przypadku innych toreb ilość rotacji wpływa na ostateczny wynik badania techniką LCA [17].

## 6. Podsumowanie

Analiza cyklu życia stanowi bardzo wszechstronne narzędzie i posiada szeroki zakres zastosowań. Nie jest jednak idealne i posiada również pewne ograniczenia [9]. Do najważniejszych zalet badań z wykorzystaniem techniki LCA należą m.in.:

- elastyczność,
- interdyscyplinarność,
- kompleksowość.



Oprócz tych zalet istnieje również duża liczba niekorzystnych czynników, które mogą ograniczać stosowanie analiz LCA. Zaliczamy do nich m.in.:

- czasochłonność i kosztowność,
- brak zróżnicowania czasowo-przestrzennego – stanowi to wadę, gdy uznamy, że wyniki LCA generują zbyt ogólne i oderwane od rzeczywistości. Dlatego prowadzone są próby uszczegółowienia modeli LCA,
- złożoność analiz.

Mimo tych wad zastosowanie LCA do oceny wyrobów i procesów produkcyjnych nabiera bardzo dużego znaczenia. W niedalekiej przyszłości LCA prawdopodobnie będzie zintegrowane z innymi narzędziami (zarządzanie środowiskowe), które wspomagają proces podejmowania decyzji wszędzie, gdzie kwestie ochrony środowiska są istotne. Zakres informacji analizowanych metodą LCA oraz ich dostępność, stale się powiększa, dzięki czemu metoda LCA stale się poszerza na nowe produkty oraz obszary zastosowań. Wraz ze wzrostem dostępnych danych i informacji wzrasta również precyzja analizy metodą LCA. Należy jednak wspomnieć, że tylko w niewielu przypadkach analiza ta może być wykorzystywana jako jedyny czynnik wspierający proces podejmowania decyzji. Analiza z wykorzystaniem metody LCA powinna być częścią rozwijania się koncepcji „*rozszerzonej odpowiedzialności producenta*”.

Ze względu na fakt, iż energia i surowce stanowią podstawowy element w każdym aspekcie życia gospodarczego i społecznego, pojawia się zagadnienie efektywnego gospodarowania dostępnymi zasobami oraz minimalizowania wpływu na środowisko wywołanego przez konsumpcję tych zasobów. Ze względu na kompleksowość metody LCA możliwe jest zdefiniowanie najbardziej efektywnego gospodarowania zasobami zarówno pod względem ekologicznym, jak i ekonomicznym. Zatem LCA stanowi bardzo dobre narzędzie w opracowywaniu sposobów zmniejszenia konsumpcji surowców naturalnych i energii przy zachowaniu wystarczającej podaży dóbr i usług.

## Literatura

- [1] „*Strategia wdrażania w Polsce zintegrowanej polityki produktowej*”. Dokument przyjęty przez Komitet Europejski Rady Ministrów w dniu 25 lutego 2005 r., Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2005.
- [2] J. Kulczycka i inni, *Opracowanie metodyki LCA dla oceny projektów infrastrukturalnych*, Kraków 2008.
- [3] J. Kulczycka, M. Góralczyk, K. Koneczny, P. Przewrocki, A. Wąsik, *Ekologiczna ocena cyklu życia (LCA) nową techniką zarządzania środowiskowego*, IGSMiE PAN, Kraków 2001.
- [4] G.A. Gaillard, *From input-output Tables to Modelling Environmental Issues* 16th Discussion Forum on LCA, Plenary Session: Abstracts. Gate to EHS: Life Cycle Management – Global LCA Village, April 9<sup>th</sup>, 2002.
- [5] D.T. Allan et al, *Public Policy Applications of Life Cycle Assessment*, SETAC Report, Wintergreen 1995.
- [6] PN-EN ISO 14040: *Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Zasady i struktura*. PKN, Warszawa 2009.
- [7] PN-EN ISO 14044: *Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Wymagania i wytyczne*. PKN, Warszawa 2009.
- [8] [www.lcinitiative.unep.fr](http://www.lcinitiative.unep.fr)
- [9] A. Lewandowska „*Środowiskowa Ocena Cyklu Życia Produktu na przykładzie wybranych typów pomp przemysłowych*”, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej, Poznań 2006.
- [10] *Zarządzanie środowiskowe. Komentarz do norm serii ISO 14000*, PKN, Warszawa 2005,

- [11] W. Strykowski, A. Lewandowska, Z. Wawrzynkiewicz, A. Noskowiak, W. Cichy, *Środowiskowa ocena cyklu życia (LCA) wyrobów drzewnych*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Drewna, Poznań 2006.
- [12] Z. Kowalski, J. Kulczycka, M. Góralczyk, *Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA)*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
- [13] M. Góralczyk, *Ekologiczna ocena cyklu życia w sektorze paliw i energii*  
[http://www.min-pan.krakow.pl/pbs/publikacje/LCA\\_w\\_sektorze\\_paliw.pdf](http://www.min-pan.krakow.pl/pbs/publikacje/LCA_w_sektorze_paliw.pdf),
- [14] K. Ciesielski, I. Zbiciński, *Zastosowanie oceny cyklu życia produktu (LCA) do analizy procesów inżynierii chemicznej na przykładzie procesów suszenia*, *Inż. Ap. Chem.*, **49** (2010) 31-32.
- [15] J. Kulczycka i inni, *Ewaluacja gospodarki odpadami komunalnymi w Polsce*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2009.
- [16] G.A. Blengini, *Using LCA to evaluate impacts and resources conservation potential of composting: A case study of the Asti District in Italy*, *Resources, Conservation and Recycling*, **52** (2008) 1373–1381.
- [17] H. Żakowska i inni, *Przeprowadzenie ekologicznej oceny cyklu życia (LCA) toreb wielokrotnego użytku*, praca zlecona przez Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2010.