

# Analiza cyklu życia

Ewa Klugmann-Radziemska

## Wprowadzenie

Analiza cyklu życia (LCA, ang. *Life Cycle Analysis*) z założenia obejmuje podejście „od kołyski aż po grób” w ocenie procesów przemysłowych i produktów. Ta wizja zaczyna się już w momencie wydobywania surowców pierwotnych w celu przetworzenia i wytworzenia produktu, a kończy, gdy wszystkie materiały zostają poddane utylizacji, recyklingowi lub składowaniu (rys. 1). LCA ocenia wszystkie etapy życia produktu z założeniem, że są od siebie współzależne, czyli że jedna operacja prowadzi do następnej. Umożliwia oszacowanie kompleksowego wpływu na środowisko wynikającego z każdego etapu życia produktu.

Za pierwszą analizę cyklu życia uznaje się przedstawione przez Harolda Smitha obliczenia skumulowanego zapotrzebowania na energię do produkcji chemicznych półproduktów i produktów na Światowej Konferencji Energetycznej w 1963 roku. Natomiast pierwszą kompleksową analizę przeprowadziła Coca-Cola Company w 1969 roku, porównując produkcję różnych pojemników na napoje w celu ustalenia rodzaju opakowania o najmniejszym wpływie środowiskowym. Proces ten nazwano analizą profilu zasobów i środowiska (REPA, ang. *Resource and Environmental Profile Analysis*). REPA określa ilościowo zużycie zasobów i uwalnianie produktów do środowiska w Stanach Zjednoczonych, natomiast w Europie stało się znane jako Ecobalance. Aby je wykonać, wymagane było wiele założeń, które zostały dokładnie przeanalizowane przez Agencję Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (EPA, ang. *United States Environmental Protection Agency*) [1].

Wyniki takich badań stały się łatwiej zrozumiałe w latach 90., kiedy Towarzystwo Toksykologii Środowiskowej i Chemii (SETAC, ang. *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) wydało „Kodeks praktyk” i wyróżniło 4 elementy analizy LCA: definicja celu i zakresu, analiza zbioru wejść i wyjść cyklu życia, ocena wpływu cyklu życia i udoskonalenie cyklu życia. Wraz z wydaniem pierwszej międzynarodowej normy ISO 14040 (1997) udoskonalenie było już traktowane jako część każdego z pierwszych trzech etapów i wprowadzono interpretację cyklu życia jako nowy czwarty etap.

Wciąż wprowadzane są ulepszenia do metodologii LCA, ale seria ISO 14040 jest nadal uważana za podstawowe ramy i wytyczne dla LCA:

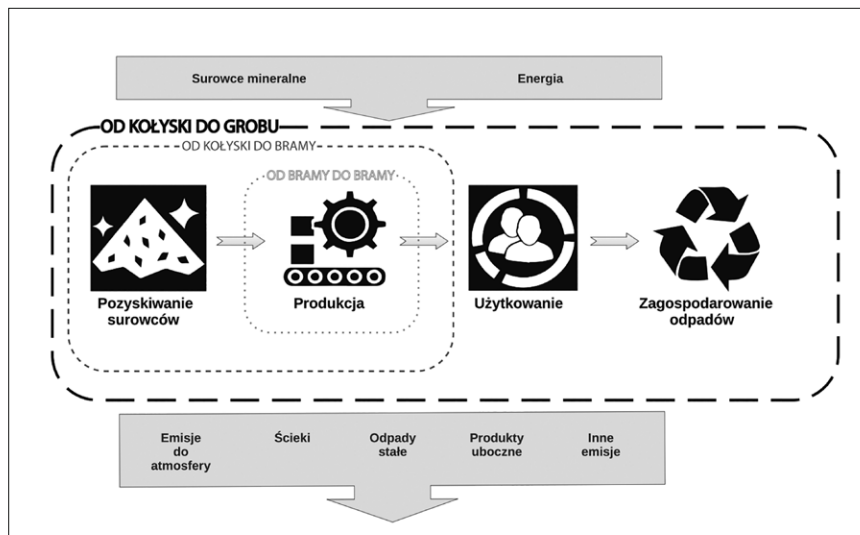
- ISO 14040:1997 na temat zasad i ram LCA [2];
- ISO 14041:1999 w sprawie definicji celu i zakresu oraz analizy zbioru [3];
- ISO 14042:2000 na temat oceny wpływu cyklu życia [4];
- ISO 14043:2000 na temat interpretacji cyklu życia [5].

Najnowsza norma ISO 14040:2006 [6] opisuje zasady i ramy oceny cyklu życia (LCA), w tym: definicję celu i zakresu LCA, fazę analizy zapasów cyklu życia (LCI), fazę oceny wpływu cyklu życia (LCIA), fazę interpretacji cyklu, raportowanie i krytyczny przegląd LCA, ograniczenia LCA, związek między fazami LCA oraz warunki stosowania wyborów wartości i elementów opcjonalnych. ISO 14040:2006 obejmuje badania oceny cyklu życia (LCA) i badania inwentaryzacji cyklu życia (LCI). Nie opisuje szczegółowo techniki LCA ani nie określa metodologii dla poszczególnych faz LCA.

## 1. Analiza cyklu życia (LCA) w ocenie wpływu na środowisko

Analiza cyklu życia składa się z 3 głównych elementów, które są ściśle ze sobą powiązane (rysunek 10.2). Elementy te to:

- cel i zakres – określenie celu i zakresu prowadzonych badań, ustalenie jednostki funkcjonalnej, strategii zbierania danych i identyfikacja ograniczeń systemu;
- analiza zbioru – zidentyfikowanie i ocena ilościowa obciążeń środowiska, w tym zużytych materiałów i energii oraz emisji i odpadów wprowadzanych do środowiska;



→ Rys. 1. Schemat wejść i wyjść procesu produkcyjnego

- ocena wpływu – klasyfikacja wyników do wybranych kategorii wpływu i przypisanie wielkości w wpływu w odpowiednio dobranych i naukowo uzasadnionych jednostkach;
- interpretacja – weryfikacja i interpretacja otrzymanych wyników w celu oszacowania dostępnych opcji minimalizacji obciążeń.

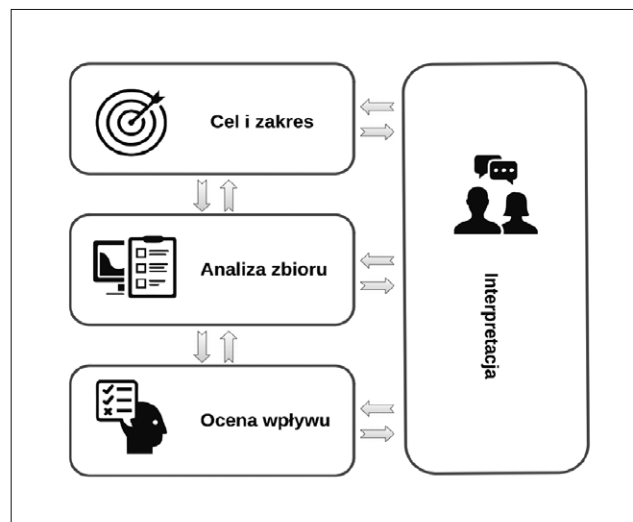
Każdy z elementów zostanie szczegółowo opisany w poniższych podrozdziałach. Za główne zalety metody LCA uważa się to, że jej charakter jest:

- wymierny i konkretny – zapewnia miarę, za pomocą której można ocenić wpływ na środowisko, dostarcza wskazówek do kompleksowej i systematycznej oceny, pomaga uniknąć rozmytych określeń, takich jak „bardziej ekologiczny”, „niski wpływ”;
- porównywalny – wyniki można wykorzystać do porównywania różnych opcji przy zastosowaniu odpowiednich założeń;
- kompleksowy – pozwala na pełniejsze zrozumienie wpływu na środowisko dzięki analizie danych od pozyskania surowców przez cały cykl życia produktu;
- informacyjny i motywujący – dostarcza informacji na temat wpływów na środowisko i pomaga zrozumieć, gdzie można dokonać ulepszeń w ramach kompromisu ekonomicznego i motywować do zmian [7].

Za wady LCA uważa się natomiast to, że bywa:

- czasochłonna – wnikliwa analiza wymaga znacznych zasobów, znajomości procesów, czasu na zgromadzenie danych, dostępu do wielu baz danych i wiedzy fachowej;
- niepełna i niepewna – metoda jest ograniczona obecnym stanem wiedzy i metodologią, często pomijane są efekty długofalowe lub lokalne, dodatkowo trudno w pełni określić skutki ekonomiczne i społeczne, a na wynik znaczny wpływ mogą mieć poczynione założenia;
- niekompletna – brak danych dla danego obszaru w bazach danych wymusza używanie danych zastępczych z innych regionów lub wydłuża czas analizy; metoda wymaga również dostępu do wielu baz danych, co jest kosztowne i pozwala na użycie wyników niepopartych udokumentowanymi metodami;
- subiektywna – niektóre aspekty wymagają osądu: co uwzględnić, jakie dane wykorzystać, z jakiego modelu skorzystać itp., co wpływa na subiektywny charakter części analizy i wymaga wiedzy fachowej, dlatego powinno się porównywać wyniki analiz wykonanych przy zbieżnych założeniach wejściowych [7].

Ważne jest określenie, czy LCA jest odpowiednim narzędziem do danego zastosowania. Ze względu na kompleksowy charakter tego typu analizy jest to najlepsza metoda do oceny pojedynczych operacji w procesie przemysłowym lub pojedynczych aspektów ryzyka, na przykład związanych z użytkowaniem produktu. W procesie podejmowania decyzji dobrze też skorzystać z dodatkowych narzędzi, takich jak: analiza ryzyka (RA, ang. *Risk Assessment*) lub analiza kosztów. LCA jest przydatne do identyfikacji głównych wpływów danego procesu produkcyjnego lub całego cyklu życia produktu na społeczeństwo i środowisko w sposób kompleksowy.



↑ Rys. 2. Schemat etapów metodyki LCA

Dla firm najkorzystniejsze może być wybranie analizy „od bramy do bramy”, co pozwala na inwentaryzację na poziomie obiektu lub stworzenie systemów śledzenie wpływu na środowisko dla całej branży.

### 1.1. Cel i zakres analizy

Wybór celu i zakresu analizy determinuje szczegółowość i wnikliwość przeprowadzonych badań. Cel polega na jednoznacznym ustaleniu przeznaczenia wyników. Stopień szczegółowości jest ściśle związany z ustalonym celem i wpływa na zakres prowadzonej analizy. Przed rozpoczęciem analizy dobrze odpowiedzieć sobie na kilka podstawowych pytań [8], by określić prawidłowo cel analizy.

Jak wyniki analizy zostaną wykorzystane?

Jaki produkt, proces i aktywność podlega analizie?

Jakie są motywacje do przeprowadzenia LCA?

Jakie elementy nie będą podlegać analizie?

Jakie elementy zostaną uwzględnione?

Bazą określenia zakresu jest zdefiniowanie jednostki funkcjonalnej (JF), czyli najmniejszej części wyrobu, która będzie podlegać analizie. Zadaniem JF jest dostarczenie płaszczyzny odniesienia przy normalizowaniu danych wejściowych i wyjściowych z analizowanego procesu. Jednostką funkcjonalną może być jednostka fizyczna (na przykład kilogram, dżul itp.), pojedyncze urządzenie lub maszyna, powierzchnia zagospodarowana przez urządzenie lub proces, jak również jednostka złożona (na przykład tonokilometr dla transportu). Najważniejsze, by JF była jasno zdefiniowana i mierzalna oraz dobrana do celu analizy.

Zakres LCA zgodnie z założeniami powinien obejmować cykl życia produktu „od kołyski po grób”, czyli od momentu pozyskania surowców do końca życia produktu po procesie użytkowania. Często jednak producenci ograniczają przeprowadzaną analizę do terenu zakładu, tzw. od bramy do bramy. Podczas analizy można się jednak skupiać na wybranych fragmentach cyklu życia, na przykład „od kołyski do bramy wyjściowej z zakładu” lub „od bramy wyjściowej zakładu po grób”, w zależności od celu analizy (rysunek 1).

Funkcjonują trzy typowe podejścia do szczegółowości przeprowadzanej analizy: pełna analiza cyklu życia, częściowa analiza cyklu życia, indywidualna analiza skupiona na konkretnym procesie [8]. Ze względu na dostępność danych i użyteczność najbardziej rozpowszechniona jest analiza częściowa, ograniczona tylko do konkretnych zakresów cyklu życia. Dobranie odpowiedniego typu analizy do celu definiuje szczegółowość prowadzonych badań (tabela 1).

Ważne jest też określenie warunków granicznych, czyli tego, które dane zostaną uwzględnione, a które zostaną wykluczone w toku analizy. Na tym etapie określa się też możliwość grupowania takich procesów jak transport, dystrybucja lub magazynowanie i traktowanie ich zbiorczo jako jednego „podprocesu”.

## 1.2. Analiza zbioru wejść i wyjść

Kompletna analiza cyklu życia gromadzi dane dotyczące zasobów, materiałów i energii potrzebnych w procesie, jak również półproduktów, produktów, emisji i odpadów. Dane, w zależności od celu analizy, są otrzymywane z zakładu produkcyjnego lub pochodzą z baz danych i są wypadkową wielu procesów dla różnych lokalizacji. Często ze względu na kompleksowość analizy stanowią zestawienie różnych procesów jednostkowych zebranych tak, by zaprezentować przepływ materiałów i energii dla analizowanego produktu. Główne zakresy obejmują:

- pozyskiwanie surowców i energii;
- produkcję, wytwarzanie i przetwarzanie;
- transport i dystrybucję;
- użytkowanie, ponowne użycie i konserwację;
- recykling i zarządzanie odpadami.

Gromadzenie danych nazywane jest inwentaryzacją procesu (LCI, ang. *Life Cycle Inventory*) i jest jednym z najbardziej czasochłonnych i pracochłonnych etapów LCA. Zaczyna się od identyfikacji procesów, których inwentaryzacja zostanie przeprowadzona, następnie gromadzone są dane dotyczące wszystkich strumieni wejść i wyjść (IO, ang. *Input and Output Analysis*) wytypowanych procesów. Ważna jest kontrola jakości zgromadzonych danych, odpowiednie przeliczanie wyników zgodnie z modelem LCI, analiza niepewności i wrażliwości danych, by przygotować raport końcowy, który zostanie użyty w kolejnym etapie. Na tym poziomie ze względu na dostępność danych może dojść do weryfikacji celu lub zakresu analizy.

W praktyce na niektórych etapach przygotowywania danych konieczne jest posługiwanie się uproszczeniami lub założeniami dla warunków granicznych procesu, ponieważ niemożliwe jest modelowanie każdego wpływu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo analizowanego produktu lub procesu. Wyznaczanie warunków granicznych nie powinno być subiektywne, a określone na podstawie norm i standardów w celu zapewnienia porównywalnych i wiarygodnych wyników analizy [9]. Do tej pory zakładano, że odcinane strumienie były nieznaczne, badania wykazały jednak, że potrafią osiągać 30% lub więcej dla bardziej rozbudowanych międzynarodowych łańcuchów dostaw [10].

↓ Tabela 1. Poziom szczegółowości niektórych zastosowań LCA

Podejmowane decyzje		Projektowanie	Udoskonalenie produktu	Etykietowanie	Tworzenie norm	Planowanie strategii rozwoju	Kształtowanie polityki produktowej	Określenie strategii marketingowej
Poziom LCA	Uproszczony	x	x		x	x		x
	Szczegółowy	x	x	x		x	x	
	Poszerzony		x	x			x	x

\* „x” wskazuje najczęściej używany poziom

Odcięcia w analizie wejść i wyjść mogą wynikać ze zidentyfikowanych źródeł i tych niezidentyfikowanych. Zidentyfikowane to te, dla których nie mamy danych i zostały one świadomie wykluczone z procesu LCA, natomiast niezidentyfikowane to te strumienie, które są pomijalnie małe lub po prostu zostały zignorowane. Błędy mogą wynikać z bagatelizowania takich etapów jak konserwacja sprzętu, która zużywa materiały i specjalistyczne narzędzia, co przekłada się na znaczne zużycie metali [11].

### 1.2.1. Pozyskiwanie surowców i energii

Zakres analizy określa, jak bardzo szczegółowa będzie inwentaryzacja pozyskiwanych surowców. Przede wszystkim występuje podział na surowce pierwotne i wtórne. Pierwotne nie zostały jeszcze przetworzone, natomiast wtórne pochodzą z procesów recyklingu lub odzysku. Przy uwzględnianiu surowców wtórnych szczególną uwagę należy zwrócić na potencjalny uniknięty koszt środowiskowy w porównaniu z użyciem surowców pierwotnych, proces związany z przygotowaniem tych surowców do ponownego użycia oraz związane z nim emisje, zanieczyszczenia i wpływ na środowisko.

Surowce pierwotne to wszelkie substraty, które można wykopać, takie jak rudy, paliwa kopalne, minerały, jak również produkty uprawne lub pozyskiwane przez zbieractwo, a także drewno, woda i powietrze. W tej kategorii uwzględnia się wszelkie surowce do wytwarzania energii, takie jak energia elektryczna (w kWh), olej napędowy, benzyna (w litrach), gaz ziemny (w m<sup>3</sup>) lub węgiel, koks itp. (w kg lub Mg). Należy zaznaczyć, z jakiego źródła pochodzi pozyskana energia, ze szczególnym uwzględnieniem, czy jest to źródło odnawialne, czy nie. Następnie całościową energię przelicza się na megadżule [MJ] i w tej formie wykorzystuje w ocenie wpływu.

Nie wszystkie surowce są pozyskiwane ze środowiska naturalnego, w zależności od zakresu inwentaryzacja może obejmować już półprodukty pozyskane z technosfery, a co za tym idzie już obciążone wpływem na środowisko. Ograniczenie analizy do wpływów z technosfery, bez głębszej analizy, może wynikać na przykład z zastrzeżonej procedury produkcyjnej jednego z substratów. Wpływa ono na wynik analizy, ale również może uniezależnić jej wynik od procesu wytwórczego określonych substratów, skupiając się tylko na wpływie środowiskowym analizowanego procesu produkcyjnego.

Należy również pamiętać o wszelkich surowcach wykorzystywanych w trakcie pozyskiwania innych substratów, takich jak pestycydy czy nawozy sztuczne w procesie uprawy roślin.



Ważnym elementem są też elementy infrastruktury użyte w procesie wytwórstwa: drogi, budynki, elementy wyposażenia, ciężkie maszyny i pojazdy. Na tym etapie uwzględnia się również emisje do powietrza, wody i gleby powstałe na etapie pozyskiwania i przetwarzania surowców. Jak wspomniano, często metoda pozyskania surowca ma znaczący wpływ na końcowy wynik LCA, dlatego ważna jest wnikliwa analiza powyższych danych. Zgromadzenie informacji i prawidłowy opis mogą być trudne, szczególnie w kwestii zagospodarowania terenu, zanikania siedlisk, zanieczyszczeń wizualnych czy skażenia hałasem.

### 1.2.2. Produkcja, wytwarzanie i przetwarzanie

Zakres ten obejmuje wszelkie procesy związane z powstaniem końcowego produktu z pozyskanych surowców. Należy uwzględnić nie tylko oczywiste procesy przetwórstwa, lecz także magazynowanie czy pakowanie produktu, zanim zostanie on przekazany do dystrybucji. Zakres przeprowadzanej analizy ponownie definiuje, jak szczegółowa będzie przeprowadzona inwentaryzacja oraz jakie procesy wstępnego przetwórstwa zostały już uwzględnione na poprzednim etapie.

Trzeba pamiętać o ewentualnych strumieniach zawracanych lub odzyskiwanych w ramach procesu produkcyjnego. Jeżeli zakład dysponuje własną linią do recyklingu i odzysku surowców, cała ta infrastruktura powinna zostać uwzględniona na tym etapie jako jeden z podprocesów. Proces produkcyjny powinien również wliczać pracę ludzką, prace konserwacyjne, zużycie surowców i energii nie tylko na linii produkcyjnej, lecz także używanych na prace administracyjne czy księgowo w ramach pracy zakładu.

Odpady generowane na terenie zakładu także są rozważane w ramach tego zakresu analizy. Ilość generowanego odrzutu z linii produkcyjnej ma wpływ na środowisko i na koszty produkcji, a w zależności od obranej ścieżki zagospodarowania lub utylizacji ten wpływ może zostać zminimalizowany lub w znacznym stopniu ograniczony.

### 1.2.3. Transport i dystrybucja

Na tym etapie uwzględnia się tylko zmianę lokalizacji lub konfiguracji produktu, a nie jego zmianę struktury. Praktycznie każdy proces produkcyjny jest zakończony transportem i dystrybucją gotowego produktu, dlatego pominięcie tego etapu znacząco obniża jakość przeprowadzonej analizy i wiarygodność otrzymanych wyników. W kwestii transportu i dystrybucji zakres może się okazać niejasny, w przypadku gdy w trakcie transportu produkt jest poddawany dodatkowym procesom, takim jak na przykład mrożenie czy mieszanie betonu.

Na potrzeby LCA stworzono definicje dystrybucji i transportu. Dystrybucja to wszelkie procesy nieobejmujące transportu, mające na celu dostarczenie produktu z zakładu wytwórczego do końcowego użytkownika. Przepakowywanie, magazynowanie czy inne działania odbywające się po opuszczeniu przez produkt bramy zakładu uznawane są za dystrybucję. Transport natomiast obejmuje zmianę lokalizacji energii lub produktu. Rozważa się tutaj zarówno transport

surowców, jak i gotowego produktu z zakładu do magazynów, punktów handlowych czy do konsumenta, jak również transport energii z miejsca jej generacji do odbiorcy. W ten zakres nie wchodzi transport na terenie zakładu produkcyjnego czy magazynów lub punktów handlowych. Rozpatruje się nie tylko zużycie paliw i wszelkich procesów związanych z jego produkcją, dostarczeniem do konsumenta i emisjami powstałymi w tych procesach i podczas spalania, lecz także energię i surowce zużyte na utrzymanie odpowiednich warunków, takie jak temperatura i wilgotność.

### 1.2.4. Użytkowanie, ponowne użycie i konserwacja

Materiały, z których został wytworzony produkt, opakowanie i konserwacja są określone na etapie projektowania produktu i determinują wpływ na środowisko podczas użytkowania. Dostosowanie produktu do potrzeb konsumenta i sposobu użytkowania oraz przeznaczenia jest kluczowe dla doboru odpowiednich materiałów czy elementów konstrukcyjnych. Projektując produkt mający obniżony wpływ na środowisko, należy również pamiętać, by zachował on pierwotną funkcjonalność. Zakres ten obejmuje to, co dzieje się z produktem od momentu zakupu i dostarczenia do konsumenta do chwili, kiedy produkt zostanie wyrzucony i trafi do procesu obróbki odpadów. Niezależnie od metody zakupu i sposobu dostawy (poczta, kurier, rurociąg itp.) faza ta liczy się dopiero od momentu otrzymania produktu przez użytkownika, a jej pierwszym etapem jest rozpakowanie i przygotowanie do użytkowania. Należy pamiętać o powstałych odpadach, takich jak opakowanie samego produktu, ale również wszelkie środki użyte do zabezpieczenia produktu w transporcie lub podczas magazynowania. W czasie przygotowania produktu do użytkowania również może dojść do zużycia energii, surowców, emisji, odcieków i zanieczyszczeń związanych z procedurą sprawdzenia sprawności, montażem lub uzupełnieniem płynów eksploatacyjnych.

Kolejny etap to samo użytkowanie produktu, w którym zawiera się również konserwacja. Tu pojawia się największa różnorodność związana z charakterystyką analizowanego obiektu. Konserwowanie obejmuje czynności na miejscu i usługę serwisu zewnętrznego, wszelki występujący na tym etapie transport, energię, zużycie surowców, odpady i powstałe emisje zanieczyszczeń.

Ponowne użycie uwzględnia użycie produktu przez nowego użytkownika zgodnie z pierwotnym założeniem, użycie niezgodne z pierwotnym założeniem (na przykład kredki w puszcze po kawie), przetworzenie produktu przez użytkownika (na przykład ścinki z niszczarki użyte jako wypełnienie paczki), oddanie produktu do zakładu produkcyjnego w celu ponownego użycia (na przykład butelki zwrotne). Ponowne użycie nie jest zależne od tego, czy produkt został sprzedany, czy oddany w formie darowizny.

### 1.2.5. Recykling i zarządzanie odpadami

Ostatni etap życia produktu do niedawna był głównie związany ze składowaniem na wysypiskach odpadów lub zrzutem do ścieków w przypadku odpadów płynnych. Jednak, obecnie

jest bardzo wiele alternatyw dla składowania. W przypadku niektórych materiałów, takich jak polietylen wysokiej gęstości (HDPE) lub politereftalan etylenu (PET), możliwy jest ich recykling dzięki dostępności sprawnie działającej infrastruktury. Inne materiały poddawane są odzyskowi energetycznemu, a jeszcze inne unieszkodliwieniu ze względu na swoje właściwości.

Główną motywacją do wdrożenia procesów odzysku są korzyści materialne, jednak nie należy zapominać o korzyściach środowiskowych i unikniętych kosztach związanych z karami legislacyjnymi lub wytworzeniem substratu z surowców pierwotnych. LCA pozwala na określenie tych korzyści w kontekście badanego produktu, jak również pomaga ustalić ścieżkę, jaką przebywa produkt od końcowego użytkownika, zanim trafi do zakładu przetwórstwa odpadów. Taka analiza zapewnia informacje, które wykorzystane w odpowiedni sposób poprawiają efektywność zbiórki odpadów i stopień odzysku.

Należy pamiętać, że na tym etapie uwzględnia się również pełną infrastrukturę związaną z procesami recyklingu, odzysku energetycznego lub unieszkodliwienia, zarówno w postaci użytego sprzętu i aparatury, jak i surowców, energii oraz paliw.

### 1.3. Ocena wpływu i metodologia w LCA

Trzecia faza procedury LCA obejmuje ocenę wpływu cyklu życia (LCIA, ang. *Life Cycle Impact Assessment*), która zostaje przeprowadzona na podstawie przygotowanej we wcześniejszym etapie inwentaryzacji (LCI). Strumienie wejść i wyjść z procesu określające ilość zużytych surowców, energii, emisji, odpadów, ścieków i wszelkich użytecznych półproduktów zostają przeliczone na ocenę wpływu na środowisko.

W odróżnieniu od innych faz w praktyce podczas LCIA głównie wykorzystywane jest specjalistyczne oprogramowanie. Automatyzacja tej fazy nie zwalnia jednak ze znajomości modeli i wskaźników stosowanych podczas LCA. LCIA dzieli się na etapy obowiązkowe i opcjonalne; do obowiązkowych zaliczamy wybór kategorii, klasyfikację i charakteryzację, natomiast nieobowiązkowe są etapy normalizacji, grupowania i ważenia.

Najbardziej popularne oprogramowanie używane do LCA to:

- GaBi – Sphera Solutions; [www.gabi.sphera.com/international/index/](http://www.gabi.sphera.com/international/index/)
- OpenLCA – GreenDelta; [www.openlca.org/](http://www.openlca.org/)
- SimaPro – Pré Consultants; [www.pre-sustainability.com/simapro](http://www.pre-sustainability.com/simapro)
- Umberto – iPoint-systems; [www.ifu.com/umberto/](http://www.ifu.com/umberto/)
- Air.e LCA – Solidforest; [www.solidforest.com/en/index.html](http://www.solidforest.com/en/index.html)
- Idemat – Idemat; [www.idematapp.com/](http://www.idematapp.com/)

#### 1.3.1. Wybór kategorii i klasyfikacja

Wybór kategorii opiera się głównie na wyborze istniejącej metody LCIA, w ramach której wytypowane są odpowiednie wskaźniki kategorii i modele charakteryzowania. Kategorią wpływu nazywamy typ oddziaływania reprezentujący

analizowane kwestie środowiskowe, do których przypisywane będą wyniki LCI. Każda kategoria jest przedstawiana ilościowo, w formie wskaźnika kategorii stanowiącego miarę danego oddziaływania. Etap klasyfikacji polega na przypisywaniu danych zgromadzonych podczas analizy zbioru wejść i wyjść do poszczególnych kategorii. Każdy z czynników z tabeli inwentarzowej może odpowiadać więcej niż jednej kategorii wpływu.

#### 1.3.2. Charakteryzowanie

Po przypisaniu wyników LCI do kategorii możliwe jest przeliczenie poszczególnych parametrów na wskaźniki kategorii dzięki modelom charakteryzowania. Modele te są naukowo uzasadnione i poparte badaniami, pozwalają na zamianę mechanizmów środowiskowych na punkt końcowy kategorii, czyli aspekt środowiska nieidentyfikujący danej kwestii, na przykład zdrowie ludzkie lub zasoby naturalne. Na ich podstawie tworzy się parametry charakteryzowania i to dzięki nim możliwe jest przekształcenie wyniku LCI we wskaźnik wpływu, który można porównywać.

#### 1.3.3. Normalizacja

Celem etapu normalizacji jest doprowadzenie wyników charakteryzacji do takiej formy, w której będą one mogły być między sobą porównywane. Wyniki charakteryzacji są wyrażane w jednostkach charakterystycznych dla danej kategorii wpływu, co sprawia trudności przy porównywaniu i ustaleniu wielkości wpływu ze względu na brak skali odniesienia. Normalizacja polega na odniesieniu potencjalnych oddziaływań do wspólnej skali, takiej jak kraj, świat lub sektor przemysłowy, co powoduje pozbycie się jednostki i pozwala na określenie skali oddziaływania w stosunku do układu odniesienia.

Normalizacja wyników ułatwia ich prezentację, nadaje im skalę odniesienia i pozwala na wyrażenie względnych potencjałów oddziaływania oraz pomaga w kontroli spójności i wiarygodności prezentowanych wyników. Jeżeli wyniki są normalizowane w odniesieniu do obszaru geograficznego (na przykład kraj, region), obywatela (na przykład mieszkańca danego kraju) lub sektora przemysłowego, to jest to normalizacja zewnętrzna. Można również normalizować wyniki w odniesieniu do innego procesu produkcyjnego – taka normalizacja określana jest mianem wewnętrznej.

#### 1.3.4. Grupowanie

Krok ten polega na umieszczeniu jednej lub kilku kategorii wpływu w klastrach lub grupach. Może obejmować sortowanie i klasyfikację w grupach na podstawie wpływu na środowisko i uzyskanego wyniku po charakteryzacji – grupy te nazywane są kategoriami szkody. Można również grupować na podstawie rankingu kategorii i ustalonej subiektywnej hierarchii wartości etycznych. W celu grupowania wyników należy sprowadzić je do wspólnej jednostki po procesie charakteryzacji lub przeprowadzić grupowanie po normalizacji i ważeniu, po to, by mieć wartości bez jednostki z udziałem wpływu.

### 1.3.5. Ważenie

Ważenie jest kolejnym nieobowiązkowym etapem oceny wpływu i można je zastosować dopiero po etapie normalizacji. Normalizacja pozwala na ustalenie ważności kategorii wpływu przez zastosowanie wag do każdego wskaźnika kategorii. Należy jednak pamiętać, że jest to etap subiektywny i nie ma naukowej ani obiektywnej podstawy, więc niezależnie od zastosowanej metody będzie stanowił odbicie subiektywnej oceny grupy osób.

Zgodnie z normą ISO 14044 [12] zabronione jest przedstawianie tylko wyników po procesie ważenia i trzeba je podawać zawsze w obecności wyników nieważonych. Przyjęty schemat ważenia powinien być spójny z celem i zakresem, brać pod uwagę grupę docelową.

Najszerzej stosowane jest zastosowanie 3 perspektyw kulturowych, których opis znajduje się w tabeli 2. Czwarta perspektywa fatalistyczna nie ma zastosowania w LCA ani odpowiadającego sobie modelu. Przyjęto ogólne założenia, na których podstawie budowano modele charakterystyki dla każdego archetypu.

## 1.4. Interpretacja

Interpretacja jest ostatnią fazą LCA, w której razem rozpatrywane są wyniki innych faz z uwzględnieniem niepewności zastosowanych danych oraz wszelkich poczynionych założeń. Proces interpretacji rozpoczyna się od identyfikacji wszelkich potencjalnie istotnych problemów, które pojawiły się w poprzednich etapach. Po rozważeniu istotności wytypowanych problemów i przeprowadzeniu niezbędnego wzmocnienia danych, ponownym rozważeniu definicji itp. wyciągane są wnioski i opracowywane zalecenia.

W wyniku interpretacji powinno się stworzyć zalecenia, które:

- są spójne z definicją celu i spełniają ograniczenia nałożone przez określony w pierwszej fazie zakres;
- uwzględniają odpowiedni dobór jednostki funkcjonalnej i granice procesu;
- są jasne i w klarowny sposób przedstawiają wnioski wynikające z analizy;
- oceniają solidność i identyfikują potencjalne słabości oraz wszelkie ograniczenia przeprowadzonej analizy.

Należy pamiętać, że podczas każdego z poprzednich etapów LCA przeprowadzana jest wnikliwa analiza niepewności i wrażliwości przez tak zwaną pętlę interakcyjną (rys. 2). Oddziałuje to na wyznaczanie granic, gromadzenie danych z inwentaryzacji i ocenę wpływu.

### 1.4.1. Analiza istotności

Pierwszym krokiem procesu interpretacji jest identyfikacja kluczowych kwestii w procesie tworzenia założeń, najważniejszych przepływów i oceny wpływu podczas wszystkich faz LCA. W pierwszej fazie warto założyć alternatywne lub możliwe do zastąpienia technologie występujące w procesie, przygotować różne scenariusze w celu określenia istotności ich wpływu na wynik końcowy i wnioski. Dla analizy wejść i wyjść przeprowadza się analizę wrażliwości, czyli

↓ **Tabela 2.** Perspektywy kulturowe reprezentowane w LCA

Model	Perspektywa czasowa	Wymagany poziom udokumentowania
Hierarchiczny (H)	Balans pomiędzy długotrwałymi i krótkimi efektami	Konsensus badań i teorii naukowych
Indywidualny (I)	Krótkotrwałe efekty	Tylko udokumentowane efekty i badania naukowe
Egalitarny (E)	Bardzo długotrwałe efekty	Wszystkie możliwe efekty, głównie na bazie niepotwierdzonych teorii

zastosowanie zmiennych układów w celu sprawdzenia ich wpływu na wynik lub potencjalnych współzależności między danymi. Podobnie jest z etapem oceny wpływu, w którym dochodzi również ocena niepewności otrzymanych wyników oraz sprawdzenie, jak wybór metody i potencjalne pominięcie kategorii mogą wpływać na końcowy wynik analizy.

### 1.4.2. Ocena kompletności i spójności

W następnym etapie interpretacji całościowo ocenia się kompletność i spójność otrzymanych wyników wraz ze szczegółową analizą niepewności. Tę fazę nazywamy ewaluacją i jest ona kluczowa dla wiarygodności otrzymanych wyników, wniosków i zaleceń. W jej wkład wchodzi sprawdzenie kompletności, analiza wrażliwości w połączeniu z analizą niepewności dla całości wyników, bez podziału na etapy, oraz kontrola spójności.

Kontrola kompletności jest przeprowadzana w szczególności dla wszystkich procesów i wpływów, które zostały zidentyfikowane jako istotne problemy środowiskowe. Dzięki temu możliwe jest ustalenie, że ten znaczący wpływ nie wynika z braku lub niekompletności informacji dla niektórych kluczowych procesów lub najważniejszych podstawowych przepływów w danych kategoriach wpływu. Jeśli zidentyfikowane luki nie będą spełniały wymagań zakresu analizy, należy ponownie przeprowadzić inwentaryzację i proces oceny wpływu, po wcześniejszym uzupełnieniu braków. Jeśli są to ograniczenia w pozyskiwaniu danych, których nie da się uniknąć, należy to uwzględnić w raporcie końcowym i podczas formułowania wniosków i zaleceń. Nawet niewielkie braki powinny zostać udokumentowane w sporządzonym raporcie kompletności.

Kontrola spójności jest przeprowadzana w celu zbadania, czy założenia, metody i dane, które zostały zastosowane w badaniu, są zgodne z celem i zakresem. Należy sprawdzić, czy wstępują różnice w jakości danych inwentaryzacyjnych względem założonej istotności procesów i czy pozyskane dane są zgodne z celem i zakresem analizy. Ważna jest kwestia reprezentatywności zebranych danych pod względem geograficznym, czasowym i technologicznym analizowanego procesu oraz adekwatności zdefiniowanych procesów jednostkowych i systemu oceny niepewności.

### 1.4.3. Analiza wrażliwości i niepewności

Analiza wrażliwości pozwala zidentyfikować procesy, które mają największy udział w końcowym wpływie całościowego analizowanego cyklu życia. Można ją przeprowadzić pod



kątem wpływu lub dominacji. Wpływ pozwala dopasować odpowiednie procesy do odpowiednich kategorii wpływu i ustalić ich wkład w wyniku końcowym, jak również określić, przez jakie strumienie ten wpływ jest wywierany. Dominacja natomiast pozwala powiązać działania i podprocesy z konkretnymi przepływami i zidentyfikować tylko te najbardziej znaczące. Połączenie analizy wrażliwości i analizy niepewności pomaga zidentyfikować punkty kluczowe dla lepszego gromadzenia danych inwentaryzacyjnych lub oceny wpływu.

Niepewności w wynikach LCA pochodzą z wielu źródeł i analiza rodzajów tej niepewności oraz określenie jej ilościowo pomaga w poprawie precyzji, wiarygodności wyciąganych wniosków i tworzonych zaleceń. Etap ten jest często pomijany, co wpływa niekorzystnie na ogólne postrzeganie wyników LCA w środowisku. Mimo że przeprowadzenie rzeczowej analizy niepewności jest pracochłonne, bardzo pozytywnie wpływa na postrzeganie przedstawionych wyników i stosowanie zintegrowanych metod pozwala na poprawę precyzji analizy i konstruowanie poprawnych wniosków. Temat niepewności w wynikach LCA został ciekawie i obszernie opisany przez Hauschilda i innych w książce *Life Cycle Assessment* [9].

#### 1.4.4. Formowanie wniosków i rekomendacji

Ostatnim etapem procesu interpretacji wyników LCA jest wyciągnięcie wniosków, identyfikacja ograniczeń oraz opracowanie zaleceń zgodnie z definicją celu, zakresu i zamierzonym zastosowaniem wyników. Wstępne wnioski wyciąga się na podstawie interpretacji istotnych kwestii środowiskowych pod kątem kompletności, wrażliwości i spójności. Następnie porównuje się wnioski z wymaganiami ustalonymi w ramach zakresu, dotyczącymi jakości danych, założeń, ograniczeń metodologicznych i badawczych. Jeśli wszystko jest zgodne i nie ma zastrzeżeń, wnioski wstępne zastępuje się wnioskami końcowymi, jeżeli nie – należy je przeformułować i sprawdzić.

Rekomendacje powstałe na podstawie wniosków końcowych powinny być logiczne i mieć uzasadnienie w wynikach analizy oraz być spójne z określonym celem LCA i nie wybiegać poza ustalenia.

#### 1.4.5. Analiza porównawcza

Podczas porównywania wyników konieczne jest wprowadzenie dodatkowych elementów do tego etapu. Dla każdego z analizowanych procesów należy ustalić możliwe rozbieżności, które mogą wpłynąć na równowagę porównania. W kwestii kompletności szczególną uwagę należy zwrócić na te elementy procesu, w których występują różnice. Jeśli w tych obszarach występują rozbieżności, to powinno się je wyeliminować i uwzględnić podczas formułowania wniosków. W przypadku analizy porównawczej na etapie kontroli spójności analizuje się również, czy zasady podziału i zakresu, a także ocena wpływu były konsekwentnie stosowane do wszystkich porównywanych procesów jednostkowych w produkcji analizowanych produktów.

Analiza niepewności jest przeprowadzana na podstawie różnicy między procesami (proces 1–proces 2), która zostaje

sprawdzona pod kątem statystycznie istotnej różnicy od zera. Należy również uwzględnić potencjalną współzmiennność między procesami jednostkowymi wewnątrz porównywanych procesów.

Norma ISO 14044 [12] wymaga, by stwierdzenia zawarte we wnioskach analizy porównawczej oparte były na analizie wrażliwości, ponieważ jeśli nie ma widocznych różnic między badanymi procesami, nie oznacza to, że różnice nie istnieją, tylko że przeprowadzona analiza nie jest w stanie w statystycznie istotny sposób ich pokazać.

## 2. Przykłady wykorzystania metody LCA w praktyce

Inżynierowie, naukowcy i urzędnicy, którzy opracowują wspomaganie prawne lub podejmują decyzje, gdzie zrównoważony rozwój jest brany pod uwagę, powinni zrozumieć potrzebę spojrzenia na rozwiązania z perspektywy cyklu życia i rozważenia możliwych kompromisów między wpływem na środowisko a trzema wymiarami zrównoważonego rozwoju. Analiza cyklu życia może mieć zastosowanie zarówno w przemyśle podczas projektowania procesów technologicznych, modernizacji linii produkcyjnych i wprowadzaniu technik pomiarowych do oznaczania wskaźników wpływu, jak i w organizacjach rządowych i pozarządowych przy planowaniu strategicznym, ustalaniu priorytetów i identyfikacji wskaźników oceny wpływu na środowisko i prawodawstwie. LCA ma również szerokie zastosowanie marketingowe w kwestii promocji prośrodowiskowej działalności firmy, na przykład przez ekoetykietowanie czy uzyskiwanie certyfikatów.

### 2.1. Zastosowanie metody LCA do oszacowania wpływu na środowisko wytwarzania energii z biomasy

Przykładem zastosowania LCA w celu zobrazowania wpływu różnych technologii wytwarzania energii na środowisko jest porównanie technologii wytwarzania energii z biomasy w odniesieniu do klasycznej energetyki węglowej [13]. Opisywana analiza obejmowała etapy produkcji surowca, przetwarzanie, transport i wytwarzania energii z biomasy, natomiast produkcja sprzętu, odzysk, amortyzacja i budowa instalacji zostały pominięte. Analizowane technologie obejmowały bezpośrednie spalanie biomasy, zgazowanie, spalanie mieszane oraz produkcję energii z biogazu i węgla. Jednostką funkcjonalną było wytworzenie 1 kWh mocy, czas życia instalacji oszacowano na 20 lat, a przyjęte moce instalacji to 2 MW, 4 MW, 20 MW, 300 MW i 1320 MW.

Główne dane objęte szczegółową analizą dotyczyły emisji zanieczyszczeń gazowych jako głównego źródła wpływu na środowisko. Uwzględniono 5 kategorii wpływu: potencjał globalnego ocieplenia (GWP), potencjał zakwaszenia (AP), potencjał tworzenia ozonu fotochemicznego (POCP), potencjał toksyczności dla człowieka (HTP) i potencjał cząstek stałych (SP). Wyniki poddano normalizacji i ważeniu, a następnie przedstawiono w postaci pojedynczego wyniku całkowitego wpływu procesu na środowisko. Najmniej inwazyjna dla środowiska okazała się technologia zgazowania biomasy (1,05 ×

$10^{-5}$  ekopunktów (Pt)), następne w kolejności są produkcja energii z biogazu pochodzącego z biomasy ( $9,21 \times 10^{-5}$  Pt), bezpośrednie spalanie biomasy ( $1,23 \times 10^{-4}$  Pt) oraz spalanie mieszane ( $3,88 \times 10^{-4}$  Pt). Natomiast w porównaniu z tradycyjnym wytwarzaniem energii z węgla korzyści odpowiednio wynoszą 97,69%, 79,69%, 72,87% i 14,56% [13].

Warto jednak pamiętać, że ważnym elementem nieuwzględnionym w powyższej analizie jest również sam proces uprawy biomasy i jej pozyskiwania. Największe znaczenie i największy wpływ na środowisko mają zmiany klimatu, ubożenie warstwy ozonowej, eutrofizacja/zakwaszenie, wykorzystanie gruntów, zmniejszenie zasobów minerałów oraz zmniejszenie zasobów kopalnych [14].

Proces uprawy biomasy wiąże się z emisją gazów cieplarnianych, zmniejszeniem zasobów mineralnych i paliw kopalnych, między innymi przez spalanie paliw silnikowych, produkcją nawozów i środków ochrony roślin oraz nawożeniem. Korzystnym zjawiskiem natomiast jest wiązanie węgla w glebie, które znacząco obniża całkowitą emisję gazów cieplarnianych. Z produkcją nawozów mineralnych i środków ochrony roślin związane jest również wymywanie nadmiaru stosowanych substancji z gleby do wód gruntowych lub wraz z wodami spływnymi do wód powierzchniowych, co przyczynia się do eutrofizacji zbiorników. Uprawa biomasy na cele energetyczne wykorzystuje również grunty i może rywalizować z terenami na uprawę biomasy do celów spożywczych.

Kolejnym przykładem jest wykorzystanie LCA do oszacowania wpływu na środowisko wytwarzania paliwa biogazowego do silników spalinowych [15]. Analizie poddano transport surowca, wytworzenie biogazu w komorze fermentacyjnej, jego oczyszczanie oraz użytkowanie jako paliwo silnikowe. Założono również, że osad pofermentacyjny zostanie wykorzystany jako nawóz do celów rolniczych. Pominięto natomiast koszty aplikacji nawozu, produkcji samochodów i urządzeń wchodzących w skład instalacji. Jako substrat przyjęto odchody zwierzęce będące odpadem powstającym w wyniku chowu krów, trzody chlewnej oraz drobiu, dlatego proces pozyskania surowca został wykluczony z analizy.

Płuczki wodne uznano za najbardziej korzystną technologię zarówno z ekonomicznego, jak i środowiskowego punktu widzenia. Jest ona również łatwo dostępna ze względu na szeroką dostępność instalacji tego typu na rynku. Przez rozpuszczanie powstałego dwutlenku węgla w wodzie wzrasta stężenie metanu w gazie wylotowym, natomiast woda z płuczki jest poddawana desorpcji na kolumnie z wypełnieniem z tworzywa sztucznego.

Największy wpływ na zmiany klimatu mają straty metanu podczas transportu oraz wytwarzania biogazu, które wynoszą 3%, oraz dwutlenek węgla powstający podczas spalania paliwa. Zastosowanie osadu pofermentacyjnego pomaga uniknąć wpływu związanego z produkcją i użyciem nawozów mineralnych, takich jak saletra amonowa i nawozy azotowe, dlatego wpływ na zużycie zasobów mineralnych, eutrofizację/ zakwaszenie i uszkodzenie warstwy ozonowej jest zrekompensowany.

Zastosowanie LCA pomaga w podjęciu decyzji inwestycyjnych i opracowaniu technologii spełniających wymogi środowiskowe.

## 2.2. Zastosowanie metody LCA do oszacowania wpływu na środowisko toreb wielokrotnego użytku

Ciekawym przykładem zastosowania LCA jest analiza 4 rodzajów toreb wielokrotnego użycia [16]. Warto zwrócić uwagę na sposób doboru jednostki funkcjonalnej. Jako punkt odniesienia wybrano nośność toreb i porównano torby mogące efektywnie przenieść 5 kg zakupów na odległość 500 m. Analizowano:

- torbę bawełnianą z nadrukiem wyprodukowaną w 2009 roku na zlecenie Ministerstwa Środowiska;
- torbę z folii polietylenowej (PE-LD);
- torbę z tkaniny polipropylenowej (PP);
- torbę papierową [16].

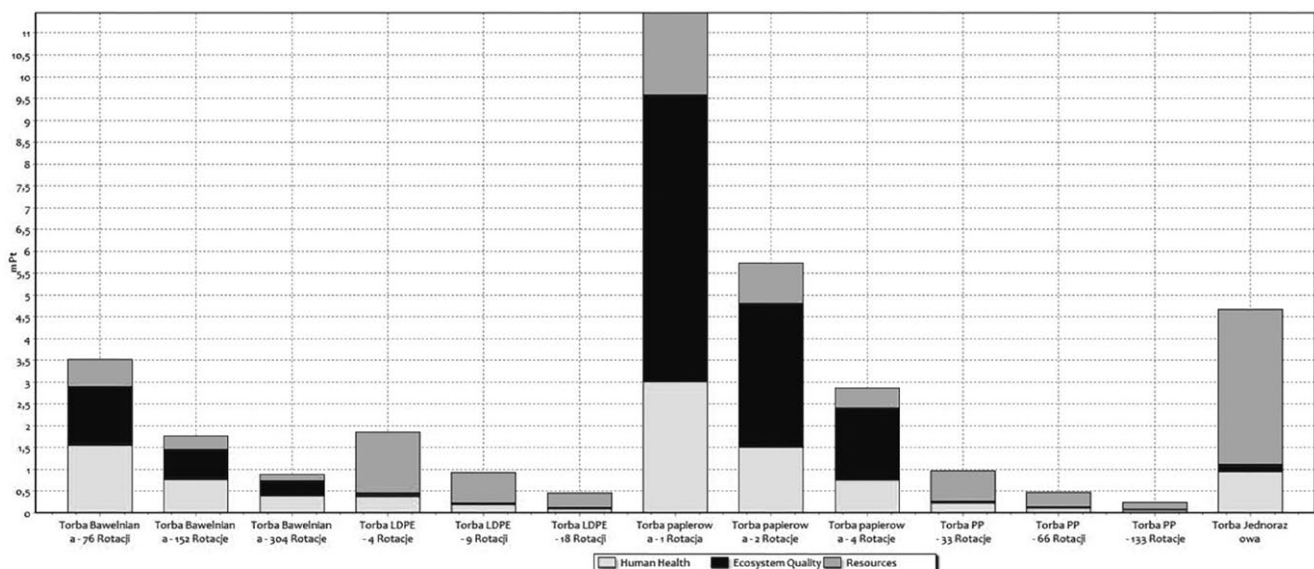
Podczas analizy skupiono się na polskich realiach w kwestii pozyskiwania surowców oraz odzysku i unieszkodliwiania odpadów opakowaniowych. Żadna z toreb nie była wytworzona z użyciem surowców wtórnych. Program użyty podczas tej procedury to SimaPro 7.1. Pre Consultants i metoda Ekowskażnika 99, a cała analiza została przeprowadzona zgodnie z wymogami normy ISO 14040:2006 [6]. Długość życia toreb określono na podstawie badań ankietowych na losowej próbie 225 osób w Warszawie, które szacunkowo określały liczbę rotacji do momentu zużycia. Do obliczeń przyjęto 3 warianty: zmniejszona dwukrotnie wartość średnia, wartość średnia, zwiększona dwukrotnie wartość średnia liczb rotacji.

Ze względu na niską wytrzymałość, a co za tym idzie niewielką liczbę rotacji w kontraście do czasu potrzebnego na wzrost drzew potrzebnych do wytworzenia pulpy celulozowej, najbardziej niekorzystnie pod kątem środowiskowym wypadają torby papierowe (rys. 3). Jednak zwiększenie liczby rotacji wpływa na znaczne zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko we wszystkich obszarach (rys. 4). Warto się zatem zastanowić, czy niska wytrzymałość jest jedynym powodem niewielkiej liczby rotacji toreb papierowych i jakie działania można by podjąć w celu zachęcenia użytkowników do rzadszej wymiany toreb.

Bardzo korzystnie wypada torba z folii polietylenowej i z tkaniny polipropylenowej – ich wysokie zużycie surowców rekompensuje wielokrotna rotacja (torba z folii polietylenowej 9, torba z tkaniny polipropylenowej 66), co zmniejsza ich negatywny wpływ na środowisko. Analiza jednak nie uwzględnia procesu rozkładu tego typu toreb. Optymistyczny jest jednak fakt, że konsumenci coraz częściej świadomie wielokrotnie używają toreb wykonanych z tworzyw sztucznych.

Torba bawełniana mimo bardzo dużej liczby rotacji (152) wypadła średnio ze względu na obecność w projekcie elementów wykonanych z tworzyw sztucznych, taki jak zamek błyskawiczny, nici i wzmocnienia. Można zatem wnioskować, że użycie prostszej torby bawełnianej o wciąż wysokiej nośności i dużej liczbie rotacji będzie miało mniejszy wpływ na środowisko w kwestii zużycia zasobów naturalnych.





↑ Rys. 3. Porównanie ocenianych toreb (średnia liczba rotacji) pod kątem kategorii szkody przy uwzględnieniu dodatkowo torby polietylenowej jednorazowego użycia [16]

Przedstawiona analiza posłużyła jako narzędzie do promocji podczas akcji rozdawania ludności toreb bawełnianych zakupionych przez miasto. Miała na celu pokazanie korzyści środowiskowych płynących z używania toreb wielokrotnego użytku, a w szczególności toreb bawełnianych. Konsument nie tylko zyskiwał torbę, lecz także podnosił świadomość związaną z wkładem wyboru opakowania na zakupy na środowisko.

### 2.3. Zastosowanie metody LCA do oszacowania wpływu na środowisko wykorzystania materiału półprzewodnikowego z recyklingu modułów fotowoltaicznych

Analiza cyklu życia może posłużyć do oceny wpływu na środowisko przy wykorzystaniu materiałów pozyskanych w procesie recyklingu materiałowego. Przykładem może być ocena obniżenia wpływu na środowisko produkcji modułów przy wykorzystaniu materiału półprzewodnikowego z recyklingu zużytych modułów fotowoltaicznych [17].

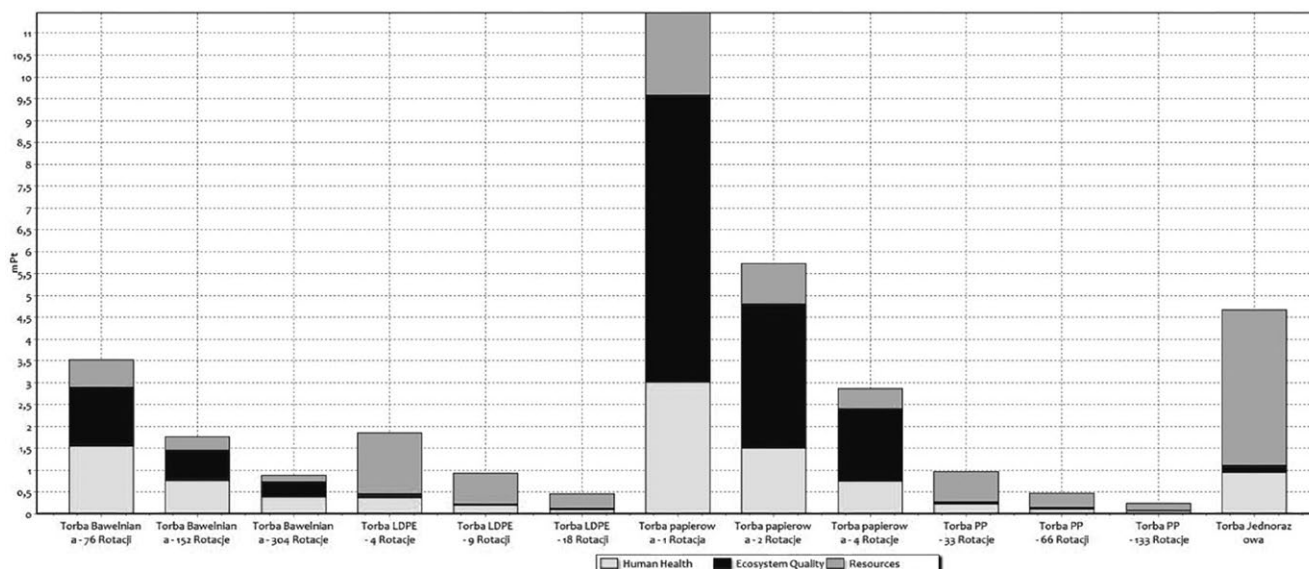
W celu uzyskania wyników porównywalnych z innymi krajami europejskimi użyto metody Ekowskaźnika 99 i oprogramowania SimaPro wyposażonego w europejskie bazy danych Ecoinvent. Wybrany model hierarchiczny daje zrównoważone wyniki skupione zarówno w krótko-, jak i długoterminowej perspektywie, co w kontekście odzysku materiałowego jest ważne i pomaga w rzeczowej analizie zjawiska. Dane wprowadzone do programu zostały uśrednione ze względu na różnice między różnymi technologiami produkcji w celu otrzymania uniwersalnych wyników. Zastosowano metodę porównawczą, analizując zużycie materiałów i energii podczas produkcji modułów fotowoltaicznych bez uwzględnienia procesów recyklingu, a także z uwzględnieniem użycia odzyskanego w procesie recyklingu krzemu. Typowy panel fotowoltaiczny z krystalicznego krzemu zawiera wagowo

około: 76% szkła, 10% folii laminującej, 8% ramy aluminiowej, 5% materiału półprzewodnikowego (krzem), 1% miedzi i 0,1% srebra i innych metali [18].

Warto zauważyć, że różnice między poszczególnymi technologiami produkcji modułów fotowoltaicznych wpływają na ilość zużytych surowców i zużycie energii oraz proces recyklingu. W przypadku odzysku płytek wykonanych z krystalicznego krzemu możliwe jest ponowne wykorzystanie aż 85% ogniw, co zmniejsza zużycie energii nawet do 70% [19].

W analizie skupiono się głównie na etapie przygotowania ogniw krzemowych ze względu na to, że na tę fazę największy wpływ ma zastosowanie odzyskanego materiału. Pozostałe etapy produkcji modułów fotowoltaicznych oraz proces ich użytkowania pozostaje bez zmian. Autorzy starali się uniknąć zaburzenia wyników przez różnice we wpływie na środowisko wynikające z rodzaju instalacji czy zastosowanych podzespołów. W wyniku analizy po normalizacji ustalono, że największy wpływ na środowisko występuje w obszarze zużycia paliw kopalnych (3,82 pt), co jest powiązane ze znacznym zużyciem energii podczas oczyszczania i obróbki krzemu. Proces Czocharalskiego na przykład wymaga 290 kWh/kg krzemu do zastosowań w elektronice. Do wytworzenia tego typu krzemu wysokiej jakości potrzeba sumarycznie 120 kWh/kg krzemu metalurgicznego [20]. Zastosowanie materiału odzyskanego w procesie recyklingu zmniejsza tę wartość do 1,49 pt. Całkowity wpływ na środowisko procesu produkcji ogniw z krystalicznego krzemu został obniżony z 5,33 pt do 2,23 pt tylko dzięki zastosowaniu materiału z odzysku.

Należy jednak pamiętać, że technologia recyklingu musi być również korzystna dla środowiska, by jej negatywny wpływ nie przewyższył zysków środowiskowych z recyklingu materiałowego. Przedstawiona powyżej analiza pokazuje jednak, jak znaczące dla środowiska i ekonomii jest stosowanie procesów recyklingu materiałowego i energetycznego.



↑ Rys. 4. Porównanie ocenianych toreb (wszystkie opcje rotacji) pod kątem kategorii szkody przy uwzględnieniu dodatkowo torby polietylenowej jednorazowego użycia [16]

## 2.4. Zastosowanie metody LCA do oszacowania wpływu na środowisko systemów gospodarki odpadami

O użyteczności analizy cyklu życia w kontekście gospodarki odpadami może świadczyć fakt powstania wielu programów skonstruowanych specjalnie w tym celu. Przykładowe modele i programy to między innymi:

- IWM-2 (Integrated Waste Management Model 2) – narzędzie programowe, które pozwala na utworzenie modelu gospodarki odpadami komunalnych (MSW) Procter & Gamble;
- ORWARE (Organic Wast Research) – model do badań odpadów organicznych;
- WRATE (Waste and Resources Assessment tool for the Environment) – umożliwiający modelowanie potencjalnych skutków (obecnych i przyszłych) i wpływów odpadów na środowisko, opracowany przez Agencję Ochrony Środowiska (EEA) w Wielkiej Brytanii;
- WISARD (Waste-Integrated Systems for Assessment of Recovery and Disposal) – oprogramowanie wspomagające ocenę alternatywnych scenariuszy gospodarki odpadami;
- LCA-LAND – oprogramowanie opracowane przez Wydział Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Technicznego w Danii dla składowisk i spalarni odpadów;
- EASEWASTE (Environmental Assessment of Solid Waste System and Technologies) – narzędzie do oceny cyklu życia stosowane w zarządzaniu odpadami; oblicza przepływy masy, zużycie surowców i odzyskane materiały, jak również wszystkie emisje do gleby, wody i powietrza [21].

Przykładem użycia LCA w celu rozwiązania problemów związanych z selektywną zbiórką odpadów była analiza przeprowadzona dla rejonu Asti we Włoszech [22]. Celem było opracowanie aspektów ekologicznych bieżącego zarządzania odpadami organicznymi, stanowiącymi 50%

stałych odpadów komunalnych. Dane wejściowe pochodziły zarówno z literatury, jak i przeprowadzonych badań naukowych, od ekspertów i międzynarodowych baz danych LCA. Tak obszerny zbiór pozwolił na zgromadzenie jak najbardziej wiarygodnych i rzeczywistych danych na temat zużywanych materiałów, energii oraz odzysku, w tym zużywanego kompostu na cele rolnicze. Wyniki otrzymane z LCA pokazały, że kompostowanie przynosi znaczne korzyści dla środowiska w porównaniu z klasycznymi metodami składowania. Powstały kompost można skutecznie użytkować w rolnictwie jako nawóz do użyźniania gleb. Analiza wykazała też, że używanie biodegradowalnych toreb jako alternatywy dla toreb z popularnych tworzywo sztucznych w celu zbiórki odpadów organicznych pozwala na 40-procentowe obniżenie zużycia energii. Emisje z kompostowania głównie wpływają na efekt cieplarniany, zakwaszenie i eutrofizację, natomiast proces obróbki odpadów ma największy wpływ na zużycie energii, zubożenie warstwy ozonowej, jak i na smog fotochemiczny.

Analizę cyklu życia dla termicznego przetwarzania odpadów i odzysku energetycznego przeprowadzono dla rejonu Bremy w północnych Niemczech [23]. Podczas LCA skupiono się na emisji gazów cieplarnianych dla różnych technologii termicznej obróbki. Wykazano, że termiczne przetwarzanie odpadów pozwoliłoby na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o około 50% względem składowania na składowisku tej samej ilości odpadów. Dodatkowo jeżeli przy okazji termicznej obróbki zostanie przeprowadzony odzysk energetyczny i generacja energii elektrycznej, doprowadzi to do dalszej redukcji gazów cieplarnianych powiązanych z produkcją energii ze źródeł konwencjonalnych. Stwierdzono także, że użycie odnawialnych źródeł, takich jak energia słoneczna, w procesach utylizacji odpadów dodatkowo wpływa korzystnie na zmniejszenie emisji; przykładem może być osuszenie

osadów ściekowych na słońcu (o 2000 Mg CO<sub>2</sub>/3000 Mg osadu).

Dla miasta Eskisehir w Turcji przeprowadzono analizę cyklu życia, porównując 5 różnych scenariuszy przerobu odpadów komunalnych: zbiorę i transport, odzysk materiałów, recykling i kompostowanie, spalanie oraz składowanie [24]. Wykorzystano oprogramowanie SimPro, a jako jednostkę funkcjonalną przyjęto 1 Mg stałych odpadów komunalnych. Wyniki przedstawiono w ekwiwalentach (eq) emisji charakterystycznych dla danej kategorii wpływu. Scenariusz uwzględniający recykling i kompostowanie okazał się mieć ujemny wpływ na zużycie zasobów (-1,08 kg eq Sb), toksyczność dla ludzi (kg eq 1,4-DB) oraz smog letni (kg eq C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), natomiast bardzo niski dodatni wpływ na efekt cieplarniany (1360 kg eq CO<sub>2</sub>), zakwaszenie (kg eq SO<sub>2</sub>) i eutrofizację (kg eq PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) względem pozostałych scenariuszy. Również po porównaniu wyników dla 3 różnych metod: Ekowskażnika 99, Ekowskażnika 95 i EPS 00, mimo różnic w ogólnych wynikach scenariusz uwzględniający odzysk odpadów, recykling surowców wtórnych i ograniczenie transportu okazał się najbardziej przyjazny dla środowiska.

Powyższe przykłady obrazują, jak różnorodne może być zastosowanie LCA przy planowaniu i modyfikowaniu planów zagospodarowania odpadów, w zależności od składu poszczególnych frakcji.

## Bibliografia

- [1] CURRAN M.A.: A Brief History of Life-Cycle Assessment, Life Cycle Assessment: Principles and Practice 2006.
- [2] Norma ISO 14040:2000 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura, 2000.
- [3] Norma ISO 14041:2002 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Określenie celu i zakresu oraz analiza zbioru, 2002.
- [4] Norma ISO 14042:2002 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Ocena wpływu cyklu życia, 2002.
- [5] Norma ISO 14043:2002 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Interpretacja cyklu życia, 2002.
- [6] Norma ISO 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura, 2009.
- [7] SIMONEN K.: PocketArchitecture: Technical Design Series, Life Cycle Assessment, Routledge 2014.
- [8] CIAMBRONE D.F.: Environmental Life Cycle Analysis, CRC Press 2019.
- [9] HAUSCHILD M.Z., ROSENBAUM R.K., OLSEN S.I.: Life Cycle Assessment, Springer 2018, doi: 10.1007/978-3-319-56475-3.
- [10] SUH S., LENZEN M., TRELOAR G.J., HONDO H., HORVATH A., HUPPES G., JOLLIET O. I IN.: System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches, Environmental Science & Technology 2004, 38(3), 657–664.
- [11] MATTILA T.J.: Input–output analysis of the networks of production, consumption and environmental destruction in Finland, rozprawa doktorska, Aalto University, Espoo, Finland 2013.
- [12] Norma ISO 14044:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne, 2009.
- [13] CHEN S. I IN.: Life cycle assessment and economic analysis of biomass energy technology in China: A brief review, Processes 2020, 8(9), 1–13, doi: 10.3390/pr8091112.
- [14] SAMSON-BRĘK I.: Zastosowanie metody oceny cyklu życia (LCA) do oszacowania wpływu na środowisko procesu uprawy biomasy przeznaczonej na cele energetyczne, Chemik 2012, 66(11), 1190–1195.
- [15] SAMSON-BRĘK I.: Zastosowanie metody oceny cyklu życia LCA do oszacowania wpływu na środowisko wytwarzania paliwa biogazowego do silników spalinowych, Archiwum Motoryzacji 2011, 181–191.
- [16] ŻAKOWSKA H.: Przeprowadzenie ekologicznej oceny cyklu życia (LCA) toreb wielokrotnego użytku, synteza pracy, 2010.
- [17] KLUGMANN-RADZIEMSKA E., KUCZYŃSKA-ŁĄŻEWSKA A.: Solar Energy Materials and Solar Cells The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production – a life cycle assessment of environmental impacts, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2020, 205, doi: 10.1016/j.solmat.2019.110259.
- [18] SANDER K. I IN.: Study on the Development of a Takeback and Recovery System for Photovoltaic Modules, European Photovoltaic Industry Association, German Solar Industries Association, Berlin 2007.
- [19] STRACHALA D., HYLSKÝ J., VANĚK J., FAFILEK G., JANDOVA K.: Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction, Acta Montan. Slovaca 2017, 22(3), 257–269.
- [20] GOPAL G.N., DUBEY S.: Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications, Royal Society of Chemistry 2010.
- [21] KULCZYCKA J. I IN.: Ewaluacja gospodarki odpadami komunalnymi w Polsce, Kraków 2009.
- [22] BLENGINI G.A.: Using LCA to evaluate impacts and resources conservation potential of composting: A case study of the Asti District in Italy, Resources, Conservation and Recycling 2008, 52, 1373–1381.
- [23] WITTMAYER M., LANGER S., SAWILLA B.: 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, 29, 732–738.
- [24] BANAR M., COKAYGIL Z., OZKAN A.: Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey, Waste Management 2009, 29, 54–62.



Fragment pochodzi z książki:

*Energetyka i ochrona środowiska. Generowanie i magazynowanie energii. Odpady energetyczne. Analiza cyklu życia*,  
Ewa Klugmann-Radziemska,  
Wydawnictwo Naukowe PWN SA