

OCENA CYKLU ŻYCIA (LCA) OPAKOWAŃ – BUTELKA PET VERSUS BUTELKA SZKLANA

Magdalena RYBACZEWSKA-BŁAŻEJOWSKA, Aneta MASTERNAK-JANUS,
Edyta BUJAK

Streszczenie: Przedmiotem niniejszego artykułu jest ekologiczna ocena cyklu życia (life cycle assessment, LCA) dwóch wybranych opakowań jednostkowych – butelki szklanej i butelki PET. Powyższa analiza porównawcza została przeprowadzona z wykorzystaniem specjalistycznych oprogramowań SimaPro i EASETECH w oparciu o metodę ILCD. Etapami, które zostały poddane badaniu LCA były proces produkcyjny i zagospodarowanie odpadu powstałego po wykorzystaniu butelek. Z przeprowadzonego badania wynika, iż butelka szklana generuje mniejsze negatywne oddziaływanie na środowisko naturalne i zdrowie człowieka w analizowanym cyklu życia. Zaobserwować to właściwie można we wszystkich kategoriach wpływu, z wyłączeniem zakwaszenia. Najistotniejsze natomiast różnice w oddziaływaniu pomiędzy butelką szklaną a butelką PET występują w następujących kategoriach wpływu: zubożenie zasobów, tworzenie ozonu fotochemicznego, zmiany klimatyczne oraz pył zawieszony.

Słowa kluczowe: ocena cyklu życia (LCA), opakowanie, butelka PET, butelka szklana, metoda ILCD

1. Wprowadzenie

Rosnąca świadomość społeczna oraz zaostrzenie wymagań prawnych w zakresie ochrony środowiska powodują wzrost zainteresowania metodami badającymi i umożliwiającymi zmniejszenie niekorzystnego oddziaływania na środowisko naturalne i zdrowie ludzkie wyrobów. Jedną z takich metod jest ekologiczna ocena cyklu życia (life cycle assessment, LCA) – technika zarządzania cyklem życia (LCM, life cycle management) [1]. Pozwala ona, ze względu na swój kompleksowy charakter, na pełną ocenę wpływu na środowisko całego cyklu życia wybranego wyrobu, począwszy od pozyskania surowców, aż do zagospodarowania odpadów powstałych w wyniku jego użytkowania (cradle-to-grave analysis albo cradle-to-cradle analysis).

Zgodnie z normą ISO 14040 i ISO 14044 metodyka badań LCA składa się z czterech faz a mianowicie: określenie celu i zakresu (*Goal and Scope Definition*), analiza zbioru wejść i wyjść (*Life Cycle Inventory, LCI*), ocena wpływu cyklu życia (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*) i interpretacja wyników (*Life Cycle Interpretation*) [2] [3]. Fazy te są ze sobą ściśle powiązane, tak by osiągnąć oszacowanie a finalnie redukcję negatywnego wpływu na środowisko danego produktu lub procesu [4].

Narzędzie oceny cyklu życia (LCA) ma uniwersalny charakter a co za tym idzie może być szeroko wykorzystywane w analizach środowiskowych dotyczących wyrobów. Jednym z tradycyjnych obszarów zastosowania LCA jest identyfikacja możliwości poprawy aspektów środowiskowych produktów na różnych etapach ich cyklu życia [5]. Mając na względzie powyższe tematem niniejszego artykułu jest ekologiczna ocena cyklu życia LCA dwóch wybranych opakowań jednostkowych – butelki szklanej i butelki PET.

Opakowanie, wśród których wyróżnia się opakowania jednostkowe, zbiorcze i transportowe, stanowi wyrób „wykonany z jakiegokolwiek materiału, przeznaczony do przechowywania, ochrony, przewozu, dostarczania lub prezentacji produktów, od surowców do towarów przetworzonych” [6]. Współczesne opakowanie jest nośnikiem czterech najważniejszych funkcji, a mianowicie: ochronnej, marketingowej, informującej i ekologicznej [7].

Z ekologicznego punktu widzenia opakowania powinny posiadać, między innymi, następujące cechy: minimalizowanie zużycia surowców i energii podczas procesu produkcji; niski stopień zanieczyszczenia wody, gleby i powietrza na etapie procesu produkcji, użytkowania i zagospodarowania odpadów; charakteryzować się możliwie małą masą, gdyż wówczas zajmują mniej miejsca podczas magazynowania i transportu; generować, jak najmniej odpadów (zarówno w ujęciu wagowym jak i objętościowym) oraz przynależeć do obowiązującego systemu organizacyjno – prawnego poprzez wykorzystywanie czytelnych i ujednoliconych znaków ekologicznych [8].

2. Charakterystyka opakowań PET

Choć proces produkcji butelek PET rozpoczęto w połowie lat 70 ubiegłego wieku to na polskim rynku pojawiły się one dopiero na przełomie roku 1989/1990 wraz ze zmianami gospodarczymi i otwarciem rynku. Aktualnie PET jest głównym tworzywem opakowaniowym wykorzystywanym w przemyśle spożywczym do produkcji różnego typu butelek, słoików oraz pojemników.

2.1. Opis surowca

Poli(tereftalan etylenu) PET to liniowy nasycony poliester kwasu tereftalowego lub jego metylowych pochodnych oraz glikolu etylenowego. W przemyśle wykorzystuje się wiele metod otrzymywania PET, wśród których najczęściej stosowane to: dwuetapowy proces wymiany estrowej i polikondensacji przeprowadzony metodą okresową lub ciągłą, dwuetapowy proces polikondensacji kwasu tereftalowego i glikolu etylenowego oraz jednoetapowy proces polikondensacji kwasu tereftalowego i tlenku etylenu [9]. Surowy PET otrzymany prosto z reaktora, nie jest wykorzystywany do bezpośredniego przetwarzania na butelki. Po zgranulowaniu poddawany jest procesom odprężania i wygrzewania w celu zmodyfikowania jego morfologii (amorficzność/ krystaliczność) i/lub zwiększeniu masy cząsteczkowej.

2.2. Technologia produkcji

Istnieją dwie podstawowe technologie produkcji butelki PET. Pierwsza wykorzystuje powietrze sprężone do ciśnienia 35-42bar. Wówczas proces formowania butelki PET składa się z trzech etapów:

- podgrzana preforma PET o temperaturze powyżej 100⁰C wprowadzana jest do formy, a następnie pręt rozciąga preformę w kierunku dna formy;
- podczas rozciągania preformy w kierunku dna wydmuchiwane jest powietrze o niskim ciśnieniu (do 10bar), które rozciąga materiał preformy w kierunku poprzecznym;
- wycofanie pręta rozciągającego i wydmuchnięcie powietrza o wysokim ciśnieniu (35 do 42bar), które kształtuje ostatecznie butelkę na formie. Następuje częściowy

odzysk sprężonego powietrza z butelki do cyklu z niskim ciśnieniem [10].

Drugi rodzaj formowania butelki PET odbywa się za pomocą czynnika hydraulicznego (woda, olej, glikol itp.) i obejmuje następujące etapy:

- rozgrzana preforma wprowadzana jest do formy, a następnie pręt rozciągający z przymocowanym balonem do głowicy wydłuża preformę w kierunku dna, jednocześnie czynnik wpływając przez szereg otworów poprzecznych rozciąga preformę poprzecznie. Nie styka się on bezpośrednio ze ścianką preformy, a tylko za pośrednictwem ścianki balona;
- pręt rozciągający dochodzi do dna formy, a czynnik dalej wpływa i rozciąga poprzecznie butelkę. Na tym etapie istnieje możliwość zmiany ciśnienia w funkcji przemieszczenia pręta, jak również zmiany temperatury czynnika;
- dalszy wpływ czynnika do balonu i ostateczne uformowanie kształtu butelki [10].

2.3. Zagospodarowanie odpadu – produkcja regranulatu

Istnieje kilka metod odzysku odpadów powstałych z butelek PET. Można je podzielić na:

- odzysk materiałowy, który wykorzystuje technologie mechaniczne tj. czyszczenie, ciecienie, mielenie, topienie, powtórne granulowanie,
- odzysk chemiczny, w którym wykorzystuje się technologie chemiczne tj. stosowanie reakcji glikolizy oraz hydrolizy, oraz
- odzysk termiczny (odzysk energii), w którym stosowane są technologie energetyczne tj. piroliza, hydrokraking, zagazowanie [11]. W Polsce opakowania PET najczęściej poddawane są odzyskowi materiałowemu. Otrzymane produkty (zmielone, umyte, zregranulowane odpady) mogą stanowić albo samodzielne surowce do wytwarzania nowych wyrobów albo surowce uzupełniające do tworzywa wyjściowego.

Zbiórka butelek PET w celu poddania ich procesom odzysku może odbywać się różnymi drogami. Przy selektywnej zbiórce z sieci handlowych do recyklingu trafiają stosunkowo jednorodne odpady. Przy zbiórce odpadów od mieszkańców, butelki PET są gromadzone wspólnie z innymi rodzajami tworzyw sztucznych i w związku z tym wymagają dodatkowego sortowania. Po sortowaniu butelki PET są pasowane w celu zmniejszenia ich objętości, a następnie transportowane do zakładów przetwórczych.

3. Charakterystyka opakowań szklanych

Szkło jest jednym z najpopularniejszych materiałów stosowanych do przechowywania żywności, napojów, czy farmaceutyków. Z uwagi na fakt, iż nie wchodzi ono w reakcje chemiczne ze znajdującymi się w nich produktami, daje gwarancję bezpieczeństwa zdrowotnego oraz zachowania naturalnych walorów smakowo-zapachowych.

3.1. Opis surowca

Butelka szklana produkowana jest ze szkła sodowo – wapniowo – krzemieniowego bezbarwnego lub posiadającego odpowiednie zabarwienie – najczęściej brązowe (amber) lub zielone. Podstawowym surowcem szklotwórczym stosowanym w produkcji szkła opakowaniowego jest tlenek krzemu (krzemionka, SiO_2) (tab. 1). Krzemionka występuje w przyrodzie jako piasek o różnej czystości, jest substancją stałą o dużej twardości, ulega topnieniu w temperaturze 1710°C . Tlenek sodu (Na_2O) jest surowcem modyfikującym,

wprowadzony do wsadu w postaci sody kalcynowanej powoduje rozrywanie sieci przestrzennej w szkłe a tym samym obniża temperaturę mięknięcia szkła. Tlenek wapnia (CaO) pełni rolę stabilizatora, gdyż zapobiega rozpuszczaniu szkła w wodzie a tym samym zwiększa połysk i wytrzymałość szkła na działanie czynników atmosferycznych. Tlenek glinu (Al_2O_3) w szkłe opakowaniowym obniża krytyczną prędkość krystalizacji, zwiększa odporność chemiczną na działanie wody oraz zmniejsza rozszerzalność cieplną [12].

Tab.1. Typowy skład szkła opakowaniowego

SKŁADNIK	ZAWARTOŚĆ PROCENTOWA [%]
Tlenek krzemu (SiO_2)	71 – 73
Tlenek sodu (Na_2O)	12 – 14
Tlenek wapnia (CaO)	9 – 12
Tlenek magnezu (MgO)	0,2 – 3,5
Tlenek glinu (Al_2O_3)	1 – 3
Tlenek potasu (K_2O)	0,3 – 1,5
Trójtlenek siarki (SO_3)	0,05 – 0,3
Modyfikatory barwy itp.	Śladowa

Źródło: Ministerstwo Środowiska, Najlepsze dostępne techniki (BAT). Wytyczne dla branży szklarskiej [12]

3.2. Technologia produkcji

Proces produkcji butelki oparty jest na szkłe sodowo – wapniowo – krzemieniowym i sodowo – wapniowym zmodyfikowanym. Całkowicie zautomatyzowana produkcja opakowań szklanych jest stosowana do formowania butelek prawie we wszystkich rozmiarach, kształtach i kolorach.

Opakowanie szklane wytwarzane jest w dwóch etapach procesu formowania przy zastosowaniu technik tłoczenia i wydmuchiwania. W zautomatyzowanej produkcji butelki szklanej występuje pięć faz:

- otrzymanie porcji stopionego szkła (kropki) o odpowiedniej wadze i temperaturze,
- formowanie bańki w pierwszej formie (przedformie) za pomocą ciśnienia sprężonego powietrza lub metalowego wytłocznika,
- przeniesienie bańki do formy ostatecznej (formy właściwej),
- uzyskanie końcowego kształtu wyrobu poprzez rozdmuchiwanie opakowania sprężonym powietrzem do otrzymania kształtu formy właściwej,
- przekazanie końcowego produktu do procesów następujących po formowaniu tj. uszlachetniania, pakowania i magazynowania.

3.3. Zagospodarowanie odpadu – produkcja stłuczki szklanej

Odpady ze szkła, w zależności od sposobu ich gromadzenia, mogą albo zostać przekazane do ponownego użycia (w systemie kaucyjnym) albo poddane odzyskowi materiałowemu (w systemie selektywnego gromadzenia odpadów). Poużytkowe opakowania szklane można nieograniczoną ilość razy przetapiać na nowe produkty, bez obniżania ich jakości. Nadają się do tego wszystkie rodzaje opakowań szklanych produkowane ze szkła sodowo – wapniowo – krzemowego, zarówno te w kolorze bezbarwnym, jak i barwione. Ponadto zastosowanie stłuczki szklanej w procesie produkcji wyrobów ze szkła niesie za sobą szereg korzyści środowiskowych, w tym zastępuje surowce pierwotne, znacznie obniża zużycie energii i wydłuża czas użytkowania pieców hutniczych [13].

Stłuczka szklana gromadzona w ramach selektywnej zbiórki opakowań szklanych, zanim zostanie przekazana do odzysku, poddawana jest procesowi uzdatniania. Obejmuje on oczyszczanie np. z zanieczyszczeń lekkich oraz metali, mielenie do frakcji wymaganych w hutach szkła oraz sortowanie na kolory. W tym celu wykorzystywane są, między innymi, takie urządzenia, jak klasyfikatory powietrzne, separatory ferromagnetyczne i indukcyjne, młyny, separatory elektro-optyczne [14].

4. Ocena cyklu życia (LCA) butelki PET i butelki szklanej

Koncepcyjny wariant LCA wykorzystany został do komparatywnej analizy dwóch alternatywnych opakowań do napojów – butelki PET i butelki szklanej. Kwestia oddziaływania opakowań i materiałów opakowaniowych na środowisko naturalne i zdrowie ludzkie w ostatnich latach znacznie zyskała na znaczeniu. Odzwierciedleniem tych tendencji w przemyśle opakowaniowym jest poszukiwanie takich opakowań, które zabezpieczą pakowany produkt przed czynnikami zewnętrznymi, znacząco wydłużą okres zachowania przez niego jakości i wartości użytkowej oraz cechować się będą jak najmniejszym negatywnym wpływem na środowisko [15].

Analiza LCA butelki PET i butelki szklanej przeprowadzona została zgodnie z metodyką normy ISO 14040 i 14044 a tym samym objęła: określenie celu i zakresu, inwentaryzację danych (LCI), ocenę wpływu na środowisko (LCIA) i interpretację wyników.

4.1 Cel i zakres analizy

Celem niniejszego badania LCA jest dokonanie analizy obciążeń środowiskowych dwóch rodzajów opakowań (butelki PET i butelki szklanej) na etapie produkcji i zagospodarowania powstałych odpadów. Butelka PET i butelka szklana produkowane są z całkowicie odmiennych materiałów, dlatego niemożliwym jest, bez rzetelnej analizy, wskazanie, która z nich powoduje większe zagrożenie dla środowiska naturalnego.

Jako jednostkę funkcjonalną w LCA przyjęto butelkę o pojemności 1000ml (waga butelki PET 0,031kg, natomiast butelki szklanej 0,46kg). Zdefiniowano taką jednostkę funkcjonalną na potrzeby obliczenia poziomu wpływu na środowisko i dokonania porównania pomiędzy określonymi w analizie opakowaniami.

Granice systemu badania LCA obejmują proces produkcji obu butelek, napełnianie i użytkowanie opakowania a następnie zbiórkę i magazynowanie oraz zagospodarowanie powstałych odpadów. Z granic analizy został wyłączony etap transportu opakowań.

Ponadto poczyniono założenie, iż napełnianie poszczególnych butelek produktem oraz użytkowanie nie generuje negatywnych oddziaływań na zdrowie ludzkie i środowisko naturalne wynikających z użytych opakowań. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 29 maja 2012r. przyjęto docelowe 50% poziomy recyklingu i przygotowania do ponownego użycia [16].

4.2 Inwentaryzacja danych (LCI)

Na etapie LCI zostały zidentyfikowane, zgromadzone oraz obliczone dane środowiskowe wchodzące do analizy LCA butelki PET i butelki szklanej. W efekcie otrzymano katalog wszystkich wykorzystywanych materiałów i energii oraz generowanych emisji i odpadów dla każdego procesu jednostkowego znajdującego się w strukturze systemu wyrobu.

Etap produkcji butelki jest pierwszym procesem jednostkowym wyodrębnionym z cyklu życia opakowania. Na jego też przykładzie zostanie omówiona faza LCI. Wejścia i wyjścia do procesu produkcyjnego zostały oszacowane dla obranej jednostki funkcjonalnej i przedstawione w postaci tabeli inwentarzowej. Wejścia do procesu produkcyjnego reprezentują ilościowe zapotrzebowanie na poszczególne materiały (np. wodę i ropę naftową w przypadku butelki PET) i energii potrzebnych do wyprodukowania jednej butelki, od momentu pozyskania surowca do przetworzenia na opakowanie (tab. 1 i tab. 2). Energia elektryczna reprezentuje skumulowaną wartość zapotrzebowania energetycznego odnoszącego się do całkowitego zużycia energii podczas wszystkich operacji produkcyjnych. Wyjścia z procesu produkcyjnego obejmują emisje do powietrza, wody oraz odpady stałe generowane w trakcie procesu produkcyjnego butelki (tab. 2).

Tab. 1. Przykładowa tablica inwentarzowa wejść – proces produkcji butelki PET

WEJŚCIA	JEDNOSTKA	ILOŚĆ
Energia elektryczna	kWh	0,125
Woda	l	42,02
Ropa naftowa	g	800

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Dogan Kirsén [17]

Tab. 2. Przykładowa tablica inwentarzowa wyjść – proces produkcji butelki szklanej

EMISJE DO POWIETRZA	
PARAMETR	JEDNOSTKA [g]
Tlenek węgla wyrażony jako CO	0,069
Amoniak wrażony jako NH ₃	0,0207
Pył	0,02415
Chlorowódór wyrażony jako HCl	0,0138

Fluorowódor wyrażony jako HF	0,000386
SO _x wyrażone jako SO ₂	0,138
Związki tytanu wyrażone jako Ti	0,00345
Związki cyny, w tym związki cynoorganiczne, wyrażone jako Sn	0,00345
Chlorowódor wyrażony jako HCl	0,0207
Metale ciężkie	0,00414
NO _x wyrażony jako NO ₂	0,552
EMISJE DO WODY	
Parametr	JEDNOSTKA [mg]
Zawiesina	24,84
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT)	107,64
Siarczany wyrażone jako SO ₄ ²⁻	828
Fluorki wyrażone jako F	4,968
Węglowodory ogółem	12,42
Ołów wyrażony jako Pb	0,2484
Antymon wyrażony jako Sb	0,414
Arsen wyrażony jako As	0,2484
Bar wyrażony jako Ba	2,484
Cynk wyrażony jako Zn	0,414
Miedź wyrażona jako Cu	0,2484
Chrom wyrażona jako Cr	0,2484
Kadm wyrażony jako Cd	0,0414
Cyna wyrażona jako Sn	0,414
Nikiel wyrażony jako Ni	0,414
Amoniak wyrażony jako NH ₄	8,28
Bor wyrażony jako B	2,484
Fenol	0,828

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Najlepsze dostępne techniki (BAT).
Wytyczne dla branży szklarskiej

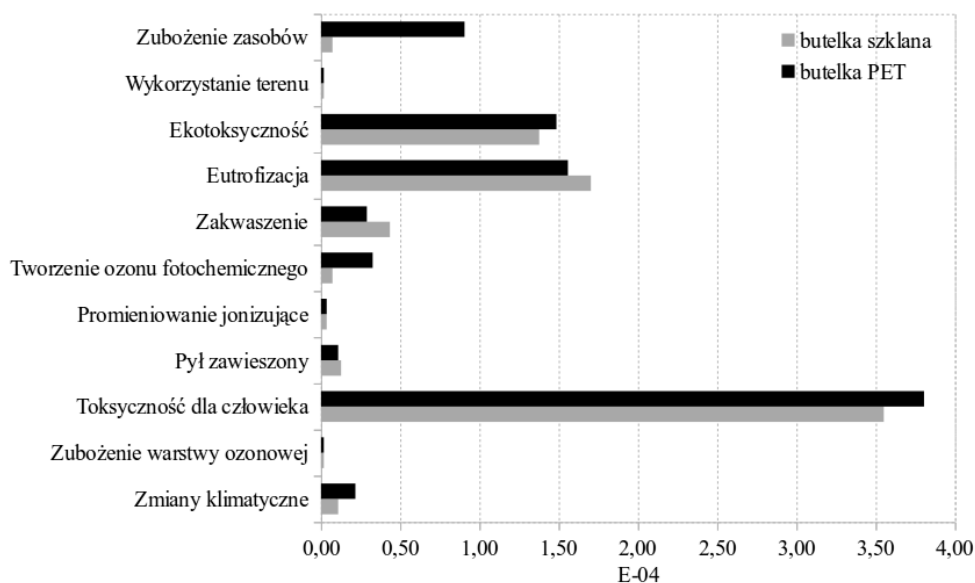
4.3 Ocena wpływu cyklu życia na środowisko (LCIA)

Etap oceny wpływu cyklu życia LCIA butelki PET i butelki szklanej pozwala na wyznaczenie zależności środowiskowych wszystkich wejść i wyjść oraz określenie wielkości ich wpływu. W wyniku przeprowadzenia trzech powyższych etapów LCA uzyskuje się profil środowiskowy danego wyrobu wyrażony w obranych kategoriach wpływu. Dobór kategorii wpływu jest dokonywany przez prowadzącego badania, jest on jednak uzależniony od stosowanego modelu charakteryzowania.

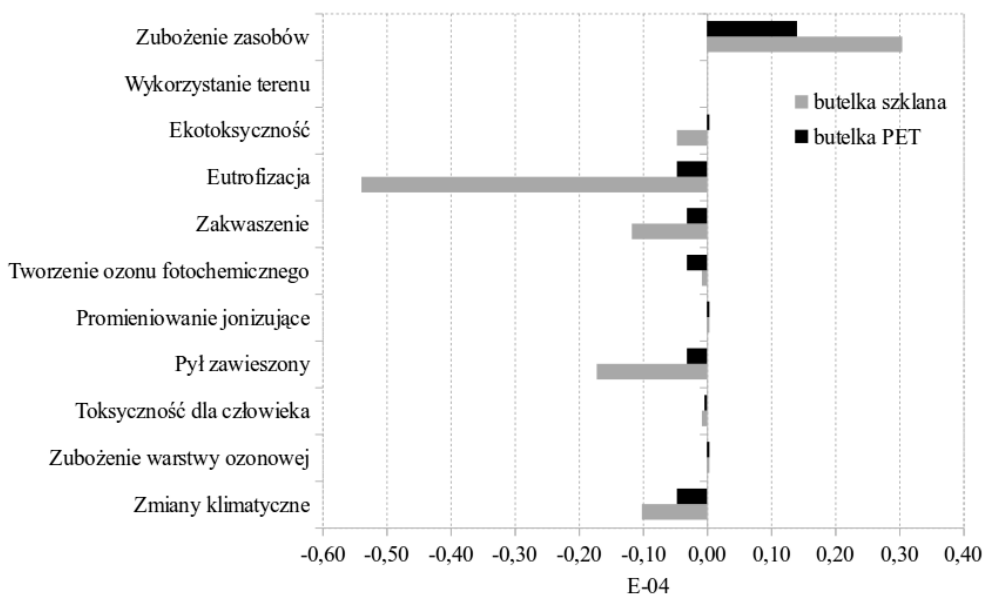
Analiza LCIA została przeprowadzona z wykorzystaniem specjalistycznych programów komputerowych SimaPro i EASETECH. Pierwszy z nich, program SimaPro wraz z wbudowaną bazą danych Ecoinvent, jest jednym z najczęściej wybieranych oprogramowań do przeprowadzania złożonych analiz LCA na świecie. Jego atutami są bowiem uniwersalizm a tym samym może być on stosowany do wykonywania analiz LCA zarówno produktów, jak i procesów, kompatybilność z wymaganiami normy ISO 14040 i ISO 14044 oraz rozbudowana biblioteka metod LCIA. Drugi z nich, program EASETECH, został opracowany przez grupę badawczą Duńskiego Uniwersytetu Technicznego w Kopenhadze i jest jednym z wiodących oprogramowań wybieranych do przeprowadzania złożonych analiz LCA systemów gospodarki odpadami. Jego znamienymi cechami są możliwość modelowania niejednorodnego pod względem masy i składu strumienia materiałów, jakim są odpady, rozbudowana i aktualizowana baza danych dotycząca składów morfologicznych odpadów, transportu oraz technologii odzysku i unieszkodliwiania odpadów, czy wreszcie rozbudowana biblioteka metod LCIA [18].

W celu przekształcenia danych LCI we wskaźniki kategorii wpływu wykorzystano metodę ILCD, której powstanie jest wynikiem projektu przeprowadzonego przez Wspólne Centrum Badawcze (JRC) Komisji Europejskiej. Pozwala ona na przedstawienie oceny oddziaływań na środowisko naturalne w następujących kategoriach wpływu: zmiany klimatyczne, zubożenie warstwy ozonowej, toksyczność dla człowieka, pył zawieszony, promieniowanie jonizujące, tworzenie ozonu fotochemicznego, zakwaszenie, eutrofizacja, ekotoksyczność, wykorzystanie terenu, zubożenie zasobów.

Wyniki etapu LCIA butelki PET i butelki szklanej zostały przedstawione na histogramach w formie znormalizowanych profili środowiskowych. Zarówno proces produkcyjny butelki PET, jak i butelki szklanej negatywnie wpływają na środowisko naturalne oraz zdrowie ludzkie (rys. 1). W przypadku butelki PET widoczne jest to szczególnie w następujących kategoriach wpływu: toksyczność dla człowieka, a następnie eutrofizacja, ekotoksyczność oraz zubożenie zasobów. Przyczyn takiego stanu rzeczy jest wiele, ale szczególnie wymienić należy duże zużycie wody w procesie produkcyjnym, stosowanie w procesie produkcyjnym energii elektrycznej pochodzącej z nieodnawialnych źródeł energii oraz emisje zanieczyszczeń, w tym CO₂, NO_x oraz węglowodanów. W przypadku butelki szklanej również najwyższą wartość odnotowuje się dla kategorii wpływu: toksyczność dla człowieka, co spowodowane jest wykorzystywaniem w procesie produkcyjnym energii elektrycznej pochodzącej z paliw kopalnych oraz obecnością w emisjach do powietrza i wody następujących związków: metali ciężkich (ołów, cynk, chrom, kadm, miedź, cyna, nikiel), arsenu, fluorowodoru. Na kolejnych miejscach uplasowały się następujące kategorie wpływu: eutrofizacja, ekotoksyczność oraz zakwaszenie, które powodowane są, między innymi, przez SO_x, NO_x, siarczany, amoniak, węglowodory ogółem.



Rys. 1. Znormalizowany profil LCA dla procesu produkcji butelki PET i butelki szklanej
 Źródło: Opracowanie własne



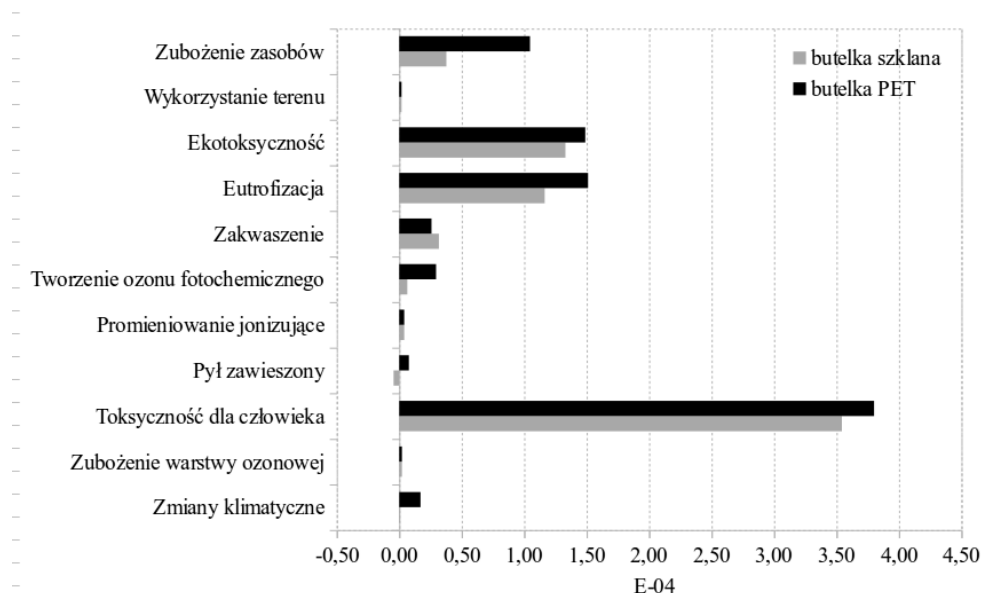
Rys. 2. Znormalizowany profil LCA dla procesu zagospodarowania odpadów dla butelki PET i butelki szklanej
 Źródło: Opracowanie własne

Przy założeniu 50% poziomu recyklingu i przygotowania do ponownego użycia, zarówno proces zagospodarowania odpadów powstałych po wykorzystaniu butelki PET,

jak i butelki szklanej pozytywnie wpływają na środowisko naturalne i zdrowie ludzkie, z wyłączeniem kategorii wpływu: zubożenie zasobów (rys. 2). Wszystkie pozostałe kategorie wpływu posiadają wartość ujemną, co oznacza korzystny wpływ, tzw. uniknięte wpływy. Można to wyjaśnić odzyskiem materiałowym surowców wtórnych zawartych w powyższych opakowaniach. W przypadku butelki PET, regranulat PET ma bardzo szerokie zastosowanie, między innymi do produkcji takich wyrobów, jak włókna i przędze poliestrowe, wyroby trwale formowane wtryskowo, czy opakowania do chemii gospodarczej. Natomiast w przypadku butelki szklanej, stłuczka szklana może być ponownie wykorzystywana przy produkcji wyrobów szklanych w hutach szkła oraz przy produkcji szeregu wyrobów dla przemysłu budowlanego.

4.4 Interpretacja wyników

Przeprowadzona, przy wykorzystaniu metody ILCD, analiza LCA cyklu życia butelki PET i butelki szklanej wykazała, iż butelka szklana generuje mniej negatywnych oddziaływań na środowisko naturalne i zdrowie ludzkie w całym analizowanym cyklu życia a zatem na etapie procesu produkcyjnego i zagospodarowania odpadu (rys. 3). W obu przypadkach największe negatywne oddziaływania występują w następujących kategoriach wpływu: toksyczność dla człowieka, eutrofizacja, ekotoksyczność, zubożenie zasobów oraz zakwaszenie (na korzyść butelki PET). Najistotniejsze natomiast różnice w oddziaływaniu występują w następujących kategoriach wpływu: zubożenie zasobów, tworzenie ozonu fotochemicznego, zmiany klimatyczne oraz pył zawieszony. Różnice w zubożeniu zasobów wynikają głównie z faktu, iż w procesie produkcji butelki szklanej wykorzystuje się znacznie mniejsze ilości wody niż przy produkcji butelki PET.



Rys. 3. Porównanie znormalizowanych profili LCA dla cyklu życia butelki PET i butelki szklanej

Źródło: Opracowanie własne

5. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy wynika, iż opakowania szklane mają mniejszy negatywny wpływ na środowisko naturalne niż opakowania PET, ponieważ wykorzystują one mniej zasobów, minimalnie wpływają na zubożenie warstwy ozonowej, promieniowanie jonizujące i wykorzystanie terenu. Można poddawać je odzyskowi materiałowemu i po przetworzeniu na stłuczkę szklaną mogą być ponownie przetwarzane na nowe pełnowartościowe wyroby w hutach szkła. Pozostaje zatem mieć nadzieję, iż zmniejszenie się w ostatnich latach w Polsce zapotrzebowania na butelki szklane, w wyniku wprowadzenia opakowań jednorazowego użytku z tworzyw sztucznych, jest tylko zjawiskiem przejściowym i wzorem krajów Europy Zachodniej nastąpi w Polsce zwrot do opakowań wielokrotnego użytku ze szkła.

Literatura

1. Masternak-Janus A., Rybaczewska-Błazejowska M.: Life cycle analysis of tissue paper manufacturing from virgin pulp or recycled waste paper, *Management and Production Engineering Review*, 6, 3, 2015, 47-54.
2. ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
3. ISO 14044:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.
4. Barański A, Gworek B., Bojanowicz-Bablok A.: Ocena cyklu życia: teoria i praktyka, Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, 2011, 7-13.
5. Masternak-Janus A., Rybaczewska-Błazejowska M.: Life Cycle Assessment (LCA) – methodology and applicability. Contemporary conditions of development of socio-economic World-Poland-Świętokrzyskie region, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2014, 506-517.
6. Ustawa z dnia 13 czerwca 2013 r. o gospodarce opakowaniami i odpadami opakowaniowymi (Dz. U. 2013 poz. 888).
7. Korzeniowski A., Skrzypek M., Szyszka G.: Opakowania w systemach logistycznych, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań, 2010.
8. Lisińska-Kuśnierz M., Ucherek M.: Współczesne opakowania, Wydawnictwo Naukowe Polskiego Towarzystwa Technologów Żywności, Kraków, 2003, 20-22.
9. Synteza poli(tereftalanu etylenu) w skali ćwierćtechnicznej [przeglądany 20.05.2015]. Dostępny w: <http://mailgrupowy.pl/shared/resources/13776,technologia-chemiczna-procesy-przemyslu-chemicznego/56895,technologia-chemiczna-laboratorium-instrukcja-pet>.
10. Czy tylko rozdmuch? Przegląd możliwości technologicznych przy produkcji butelki PET [przeglądany 15.05.2015]. Dostępny w: <http://e-bmp.pl/Image/56-57.pdf>.
11. Buczek, B., Chwiałkowski, W.: Sposoby zagospodarowania odpadów z poli(tereftalanu etylenu) [przeglądany 25.05.2015]. Dostępny w: https://www.google.pl/?gws_rd=ssl#q=zagospodarowanie+odpadu+butelka+pet+pdf.
12. Ministerstwo Środowiska: Najlepsze dostępne techniki (BAT). Wytyczne dla branży szklarskiej, Warszawa, 2004, 28-34.
13. Przywarska R., Kotowski W.: Podstawy odzysku, recyklingu i unieszkodliwiania odpadów, Wyższa Szkoła Ekonomii i Administracji, Bytom, 2005, 93-97.

14. Zagospodarowanie odpadów szklanych [przełączany 04.01.2016]. Dostępny w: <http://www.swiat-szklapl/wydawnictwo/1351-zagospodarowanie-odpadow-szklanych.html>.
15. Ekoinnowacje w opakowaniach [przełączany 07.01.2016]. Dostępny w: http://ekoinnowator.ue.poznan.pl/files/Biuletyn_nr_4.pdf.
16. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 29 maja 2012r. w sprawie poziomów recyklingu, przygotowania do ponownego użycia i odzysku innymi metodami niektórych frakcji odpadów komunalnych (Dz. U. 2012 poz. 645).
17. Dogan Kirsen S.: Life cycle assessment of PET bottles, (nieopublikowane) 2008, 30-34.
18. Rybaczewska-Błażejowska M.: Narzędzia oceny cyklu życia (LCA) a modelowanie systemów gospodarki odpadami. Zarządzanie środowiskiem i zrównoważona energetyka, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu we Wrocławiu, Wrocław, 2015, 141-150.

Dr inż. Magdalena RYBACZEWSKA-BŁAŻEJOWSKA

Dr inż. Aneta MASTERNAK-JANUS

Mgr inż. Edyta BUJAK

Katedra Inżynierii Produkcji

Politechnika Świętokrzyska

25-314 Kielce, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7

tel.: (0-41) 342 43 78

e-mail: m.blazejowska@tu.kielce.pl