

Możliwości zastosowania LCA w technologiach inżynierii środowiska

Possible applications of LCA in environmental engineering technologies

WIOLETTA M. BAJDUR, MARIA WŁODARCZYK-MAKUŁA

DOI 10.36119/15.2023.12.20

Środowiskowa Ocena Cyklu Życia – LCA (Life Cycle Assessment) opisana w normach ISO serii 14000 stanowi jedną z najważniejszych i najbardziej wiarygodnych technik oceny oddziaływania na środowisko technologii i produktów. Obecnie ma ugruntowaną pozycję jako narzędzie badawcze w obszarach nauki i praktyki, związanych ze środowiskiem. Wpływ nowych lub istniejących technologii oraz produktów na środowisko jest jednym z kluczowych problemów w państwach członkowskich Unii Europejskiej, w których dążymy do maksymalizacji odzysku materiałowego oraz powtórnego wykorzystania odpadów. Technologicznie i ekonomicznie uzasadnione jest prowadzenie recyklingu odpadów albo wykorzystanie ich jako surowców wtórnych, a także unieszkodliwianie odpadów w miejscu powstawania. Jednym z innowacyjnych rozwiązań jest modyfikacja chemiczna odpadów polimerowych w kierunku uzyskania flokulantów zastosowanych w procesach oczyszczania ścieków przemysłowych. Obecnie prowadzona jest ocena oddziaływania procesów technologicznych i by-produktów na środowisko w ich cyklu życia. Analizy LCA potwierdzają efektywne zastosowanie nowych polimerów, a w perspektywie ich bezpieczną dla środowiska produkcję. Przedstawione przykłady pozwalają na prześledzenie procedury oceny wpływu cyklu życia technologii produkcji i produktów na środowisko.

Słowa kluczowe: LCA, technologie, by-produkty, środowisko, tworzywa konstrukcyjne

Environmental Life Cycle Assessment – LCA described in the ISO 14000 series standards is one of the most important and reliable techniques for assessing the environmental impact of technologies and products. Currently, it has an established position as a research tool in areas of science and practice related to the environment. The impact of new or existing technologies and products on the environment is one of the key problems in the Member States of the European Union, where we strive to maximize material recovery and reuse of waste. It is technologically and economically justified to recycle waste or use it as secondary raw materials, as well as neutralize its waste at the point of generation. One of the innovative solutions is the chemical modification of polymer waste to obtain flocculants used in industrial wastewater treatment processes. Currently, an assessment of the impact of technological processes and by-products on the environment in their life cycle is being carried out. LCA analysis confirms the effective use of new polymers and, in the long run, their environmentally safe production. The examples presented make it possible to follow the procedure for assessing the impact of the life cycle of production technologies and products on the environment.

Keywords: LCA, technologies, by-products, environment, engineering materials

Wprowadzenie

Technika Analiza Cyklu Życia (LCA) jest wykorzystywana do badania wpływów środowiskowych technologii i produktów. LCA pozwala na oszacowanie wpływu na środowisko, procesu produkcji lub działalności, określając zużycie energii i materiałów. Analiza dotyczy także skutków środowiskowych związanych z produktem, a przede wszystkim jego oddziaływaniem w całym cyklu życia na środowisko [1-3].

Środowiskowa Analiza Cyklu Życia jest narzędziem diagnostycznym przydatnym w zarządzaniu środowiskowym. W efekcie stosowania LCA identyfikowane są obszary, które są źródłem szczególnych obciążeń dla środowiska i zdrowia ludzi. Z uwagi na to, że

odpady tworzyw sztucznych stanowią obecnie w świecie jedno z głównych źródeł surowców wtórnych, a wraz z postępowaniem cywilizacji wzrasta ilość wykorzystywanych w życiu codziennym tworzyw sztucznych, koniecznością jest dokładna i rzetelna analiza cyklu życia procesów i produktów. Związane z tym materiały pochodzenia naturalnego (drewno, metale, tkaniny itp.) są zastępowane przez polimery. Obecnie można zidentyfikować wiele odpadów, między innymi odpady spienionego polistyrenu, które stanowią cenne źródło surowca nadającego się do ponownego wykorzystania. Polistyren spieniony (styropian) wykorzystywany jest powszechnie w budownictwie i chłodnictwie jako tani materiał termoizolacyjny, a od kilkudziesięciu lat styropian ma zastosowanie do pakowania

sprzętu elektronicznego (komputery, RTV) oraz artykułów gospodarstwa domowego (AGD) i drobnej galanterii, w przypadku których kształtki styropianowe mogą stanowić nawet 100% objętości gabarytów opakowanego artykułu. W ostatnich kilkunastu latach polistyren spieniony coraz częściej wykorzystywany jest w przemyśle spożywczo-gastro-nomicznym. Bardzo liczną grupę stanowią tutaj tacki styropianowe, folia polistyrenowa, naczynia jednorazowego użytku oraz opakowania wszelkiego rodzaju nabiału wykonane z polistyrenu niespienionego. Polistyren ma zatem znaczące miejsce w różnych zastosowaniach i jest to jedno z najdłużej stosowanych tworzyw termoplastycznych i pomimo konkurencji wielu nowych materiałów, jego produkcja nadal wzrasta. Znaczne ilości wy-

dr hab. inż. prof. PCz. Wioletta M. Bajdur <https://orcid.org/0000-0003-4328-6099> – Politechnika Częstochowska, Wydział Zarządzania, Częstochowa,

prof. dr hab. inż. Maria Włodarczyk-Makuła <https://orcid.org/0000-0002-3978-2420> – Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Częstochowa. Autor do korespondencji/ Corresponding author: wiolawb@poczta.onet.pl

korzystywanego polistyrenu głównie spienionego są źródłem potencjalnych odpadów. W Polsce polistyren przez długi czas był uważany za odpad bezpieczny dla środowiska. W rzeczywistości polistyren w przeciwieństwie do wielu innych tworzyw sztucznych nie jest toksyczny, a jednak mimo to odpady polistyrenu zakwalifikowano do grupy odpadów uciążliwych. Wynika to z jego właściwości fizykochemicznych. Odporność chemiczna polistyrenu jest bardzo duża, a w temperaturze pokojowej nie reaguje na działanie zasad, roztworów soli i większości kwasów. Trudno ulega biodegradacji jak również „samodegradacji” chemicznej. Polistyren należy do tzw. grupy tworzyw fotodegradowalnych, wpływ promieniowania UV powoduje rozkład spienionych form PS, a zamknięte w porach powietrze ulatnia się. Proces ten trwa jednak stosunkowo długo, od kilkunastu do kilkudziesięciu lat, a w związku z tym polistyren przemieszany z innymi odpadami praktycznie nie ulega degradacji, natomiast skutecznie przyczynia się do ciągłego wzrostu objętości odpadów na składowiskach. Metodą, która pozwala na rzetelną ocenę cyklu życia produktów uzyskanych z odpadów między innymi polistyrenu jest LCA, rekomendowana w wielu oficjalnych dokumentach UE, ponieważ wpisuje się w najlepsze praktyki zarządzania środowiskowego.

LCA wykorzystywana jest do oceny wpływu pojedynczych wyrobów na środowisko, a także oceny strategii w przedsiębiorstwach. Pozwala zidentyfikować priorytetowe obszary działania oraz określenia strategii mającej na celu zmniejszenie wpływu na środowisko. LCA znajduje również zastosowanie w jednostkach publicznych, takich jak administracja centralna i lokalna, gdzie wykorzystywana jest do oceny grupy produktów oraz całych działów gospodarki, jak i różnych rozwiązań strategicznych w regionach. Najlepszą praktyką zarządzania środowiskowego jest włączenie do strategii i działań w zakresie gospodarowania odpadami podejścia opartego na ocenie cyklu życia [4-6]. Przykładowo modyfikowanie poużytkowych lub produkcyjnych odpadów tworzyw sztucznych może z jednej strony przyczynić się do zagospodarowania odpadów, z drugiej zaś strony do ograniczenia produkcji polimerów [7]. Wykorzystanie odpadów polistyrenowych do produkcji polielektrolitów (flokulantów) może stać się rozwiązaniem bardzo pożądanym. Zastosowanie nowej generacji polielektrolitów pozwala na kilkakrotne obniżenie zużycia stosowanego koagulantu, skraca czas flokulacji oraz poprawia zdolności sedymentacyjne zawiesin. W celu otrzymania polielektrolitów wykazujących właściwości flokulacyjne przeprowadzono syntezę sulfonowych pochodnych z odpadów spienionego polistyrenu, a otrzymane związki zastosowa-

no jako polielektrolity w procesach oczyszczania ścieków przemysłowych. W artykule przedstawiono ocenę wpływu na środowisko produktu otrzymanego z odpadów polistyrenu, którą przeprowadzono z wykorzystaniem metody Life Cycle Assessment (LCA).

Metodyka badań

Podstawą do badań środowiskowych były badania technologiczne w skali ćwierćtechnicznej procesu wytwarzania pochodnych sulfonowych odpadów spienionego polistyrenu [8]. Sulfonową pochodną odpadów spienionego polistyrenu otrzymano przez sulfonowanie odpadów polistyrenowych stężonym kwasem siarkowym (VI) (H_2SO_4), według ogólnie znanej metodyki sulfonowania związków aromatycznych. Do kolby trój szyjnej zaopatrzonej w mieszadło mechaniczne i chłodnicę zwrotną wlewano odpowiednią ilość kwasu siarkowego (VI), dodawano odpowiednią ilość siarczynu (VI) srebra (II) (katalizatora), a następnie powoli porcjami dodawano określoną ilość odpowiednio rozdrobnionych odpadów spienionego polistyrenu. Reakcję sulfonowania prowadzono w różnych temperaturach i czasie. W celu usunięcia nadmiaru kwasu siarkowego (VI) prowadzono proces wapniowania $CaCO_3$ i wytrącono produkty w postaci soli sodowych pochodnych sulfonowych odpadów spienionego polistyrenu w reakcji z Na_2CO_3 . Do badań wytypowano pochodną sulfonową polistyrenu o najwyższej procentowej zawartości siarki.

Zgodnie z założeniami zawartymi w normie ISO 14040, ocena cyklu życia prowadzona jest etapami:

- określenie celu i zakresu badań (wybór jednostki funkcjonalnej, granic systemu);
- analiza zbioru wejść i wyjść (analiza procesu technologicznego, bilans strumieni przepływów surowców, energii i materiałów pomocniczych oraz bilans odpadów, a także identyfikacja potencjalnych źródeł ich powstawania);
- ocena wpływu cyklu życia na środowisko (przekształcanie zebranych danych we wskaźniki kategorii wpływu lub kategorii szkody;
- interpretacja (wnioski i weryfikacja wyników).

Trzeci etap oceny cyklu życia może być przeprowadzony z wykorzystaniem różnych metod, najczęściej zaimplementowanych do programów komputerowych służących do badań LCA.

W artykule przedstawiono wyniki badań środowiskowych procesu produkcji nowosyntezowanego polielektrolitu z odpadów polistyrenu. Do badań wykorzystano oprogramowanie: SimaPro Developer v. 9.4.0.2, charakteryzowanie opracowano metodą EF 3.0v.1.03, a ważenie – współczynnik wagowy równy „1”

dla każdej kategorii oddziaływania. Po sporządzeniu analizy zbioru wejść i wyjść (LCI) przeprowadza się ocenę oddziaływania śladu środowiskowego, aby obliczyć ślad środowiskowy produktu przy zastosowaniu wszystkich kategorii i modeli oddziaływania śladu środowiskowego wg wybranej metody. Analizę wykonano metodą EF 3.0 z wykorzystaniem programu SimaPro wraz z zaimplementowanymi bazami danych – głównie Ecoinvent. Metoda EF 3.0 jest metodą oceny wpływu przyjętą przez Komisję Europejską (KE). Uwzględnia ona współczynniki normalizacji i wagi publikowane w listopadzie 2019 r. przez KE [9]. W tabeli 1 przedstawiono rekomendowane modele charakteryzowania, przy użyciu których zaleca się, aby było dokonywane modelowanie wpływu w ramach poszczególnych kategorii oddziaływania. Wykaz zaprezentowany w tabeli 1 odpowiada zestawowi kategorii wpływu oraz modeli charakteryzowania metody EF 3.0.

Analiza wyników badań

Dla wytworzonego nowego typu flokulantu – soli sodowej pochodnej sulfonowej polistyrenu, przeprowadzono ocenę potencjalnego wpływu jego produkcji na środowisko. Analizę LCA wykonano przy wykorzystaniu programu SimaPro. Za jednostkę funkcjonalną przyjęto 100 kg sulfonowej pochodnej odpadów spienionego polistyrenu. Założono, iż jest to dzienna wielkość produkcji.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki po etapie charakteryzowania w 16 kategoriach wpływu dla flokulantu. Wyniki we wszystkich kategoriach wpływu wyskalowane są do 100%, jednak nie są skalowane między kategoriami, widoczne są jedynie zależności procesów w danej kategorii między sobą – w taki sposób przedstawia się graficznie wyniki po etapie charakteryzowania. Dane dla każdej kategorii są przedstawione w jednostce odniesienia – np. dla zmiany klimatu – w kg ekwiwalentu CO_2 . Ze względu na to, że część wartości jest bardzo małymi liczbami, wyniki w tabeli przedstawiono w postaci liczb „naukowych”, gdzie np. 1,27E+2 oznacza liczbę 1,27x10² czyli 127, a 5,49E-5 to 0,0000549.

Z prezentowanych danych po etapie charakteryzowania wynika, iż zależnie od kategorii wpływu dominujący wpływ na środowisko ma użycie kwasu siarkowego i energii elektrycznej jako obciążenie dla środowiska. Widoczny wpływ ma też węgiel dwusodowy i węgiel wapnia oraz emisje podczas procesu produkcji. W przypadku, gdy na jednym wykresie podane są potencjalne szkody i korzyści dla środowiska, wynik w danej kategorii jest ich sumą rozumianą jako korzyść środowiskowa. Analiza charakteryzowania procesu produkcji pochodnej sulfonowej odpadów spienionego polistyrenu wykazała,

Tabela 1. Kategorie oddziaływania śladu środowiskowego wraz ze wskaźnikami kategorii oraz modelami oceny oddziaływania śladu środowiskowego rekomendowane do stosowania na potrzeby badań śladu środowiskowego produktów i organizacji [9]

Table 1. Environmental footprint impact categories with category indicators and environmental footprint impact assessment models recommended for use in product and organization environmental footprint studies

Kategoria oddziaływania śladu środowiskowego	Model oceny oddziaływania śladu środowiskowego	Wskaźnik kategorii oddziaływania środowiskowego	Źródło
Zmiana klimatu ogółem	Model z Berna – współczynnik ocieplenia globalnego w perspektywie 100 lat	Tona ekwiwalentu dwutlenku węgla	IPCC 2013
Zubożenie warstwy ozonowej	Model projektowania produktów przemysłowych z uwzględnieniem środowiska (ang. <i>Environmental Design of Industrial Products, EDIP</i>), oparty na potencjałach niszczenia ozonu (ODP) w nieokreślonej perspektywie czasowej, opracowany przez Światową Organizację Meteorologiczną (WMO)	Kilogram ekwiwalentu CFC-11	WMO 2014 + zintegrowane dane
Promieniowanie jonizujące, zdrowie człowieka	Model wpływu na zdrowie człowieka	Kilobekereł ekwiwalentu U ²³⁵ (emisja do powietrza)	Dreicer i in., 1995
Fotocemiczne powstawanie ozonu, zdrowie człowieka	Model LOTOS-EUROS	Kilogram ekwiwalentu NMZO	Van Zelm i in., 2008, zgodnie z zastosowaniem w ReCiPe
Cząstki stałe	Model PM	Zachorowalność	Fanikei in., 2016 w UNEP 2016
Działanie toksyczne dla ludzi, inne niż rakotwórcze	Model USEtox 2.1	Porównawcza jednostka toksyczności dotycząca ludzi (CTU _h)	Fanike i in. (2017), dostosowane zgodnie z Saouter i in., 2018
Działanie toksyczne dla ludzi – działanie rakotwórcze	Model USEtox	Porównawcza jednostka toksyczności dotycząca ludzi (ang. <i>comparativetoxic unit for humans, CTUh</i>)	Fanike i in. (2017), dostosowane zgodnie z Saouter i in., 2018
Zakwaszenie	Model skumulowanego przekroczenia (ang. <i>Accumulatedexceedance</i>)	Ekwiwalent mol H ⁺	Seppäläi in., 2006, Poschi in., 2008
Eutrofizacja wodna – woda słodka	Model EUTREND	Kilogram ekwiwalentu P	Struijs i in., 2009, zgodnie z zastosowaniem w ReCiPe
Eutrofizacja wodna – woda morską	Model EUTREND	Kilogram ekwiwalentu N	Struijs i in., 2009, zgodnie z zastosowaniem w ReCiPe
Eutrofizacja lądowa	Model skumulowanego przekroczenia	Ekwiwalent mol N	Seppäläi in., 2006, Poschi in., 2008
Ekotoksyczność dla wody słodkiej	Model USEtox 2.1	Porównawcza jednostka toksyczności dotycząca ekosystemów (ang. <i>Comparative toxic unit for ecosystems, CTUe</i>)	Fanike i in. (2017), dostosowane zgodnie z Saouter i in., 2018
Użytkowanie gruntów	Wskaźnik jakości gleby na podstawie modelu LANCA	Wielkość bezwymiarowa (pt)	De Laurentiis et al. 2019 oraz na podstawie LANCA CF wersja 2.5 (Horn i Maier, 2018)
Wyczerpywanie zasobów – zasoby wodne	Model dostępnej wody pozostającej AWARE (AvailableWaterREmaining)	ekwiwalent ilości wody, jakiej pozbawiony został użytkownik, w m ³	Boulay i in., 2018; UNEP 2016
Wykorzystywanie zasobów, surowce kopalne	Zubożenie zasobów abiotycznych – paliwa kopalne (ADP – surowce kopalne)	MJ	Van Oers i in., 2002, jak w metodzie CML 2002, v.4.8
Wyczerpywanie się zasobów – surowce mineralne	Zubożenie zasobów abiotycznych (końcowe zasoby ADP)	kg ekwiwalentu SB	Van Oers i in., 2002, jak w metodzie CML 2002, v.4.8

Tabela 2. Wyniki po etapie charakteryzowania dla produkcji 100 kg soli sodowej pochodnej sulfonowej polistyrenu. Źródło: opracowanie własne oraz Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie

Table 2. Results after the characterization stage for the production of 100 kg of polystyrene sulfonate sodium salt

Kategoria wpływu	Jednostka	Suma	Sól sodowa pochodnej sulfonowej polistyrenu	Kwas siarkowy	Węglan wapnia	Węglan sodu	Odpady polistyrenu	Energia elektryczna
Zmiana klimatu	kg CO ₂ eq	1,27E+02	1,87E+02	3,29E+01	2,54E+00	9,13E+00	-1,89E+02	8,42E+01
Zubożenie warstwy ozonowej	kg CFC11 eq	2,59E-06	0,00E+00	3,04E-06	3,08E-07	5,07E-07	-2,07E-06	8,01E-07
Promieniowanie jonizujące	kBq U-235 eq	4,22E+00	0,00E+00	2,61E+00	5,86E-01	3,39E-01	2,77E-01	4,10E-01
Fotocemiczne powstawanie ozonu	kg NMVOC eq	2,86E-02	0,00E+00	3,82E-01	2,74E-02	3,10E-02	-5,76E-01	1,64E-01
Cząstki stałe	diseaseinc.	2,14E-05	0,00E+00	2,68E-05	3,91E-07	9,85E-07	-7,67E-06	8,57E-07
Zdrowie ludzkie, czynniki nierakotwórcze	CTUh	3,34E-06	0,00E+00	1,54E-06	5,70E-08	4,21E-07	1,86E-08	1,30E-06
Zdrowie ludzkie, czynniki rakotwórcze	CTUh	8,77E-08	0,00E+00	6,83E-08	4,72E-09	1,34E-08	-2,74E-08	2,87E-08
Zakwaszenie	mol H ⁺ eq	4,58E+00	0,00E+00	4,39E+00	2,77E-02	1,43E-01	-5,41E-01	5,61E-01
Eutrofizacja wodna – woda słodka	kg P eq	1,31E-02	0,00E+00	1,90E-03	1,55E-04	1,04E-03	-9,79E-05	1,01E-02
Eutrofizacja wodna – woda morską	kg N eq	1,37E-02	0,00E+00	3,19E-02	8,85E-03	1,13E-02	-9,03E-02	5,21E-02
Eutrofizacja lądowa	mol N eq	4,95E-01	0,00E+00	3,74E-01	1,15E-01	3,94E-01	-9,58E-01	5,69E-01
Ekotoksyczność dla wody słodkiej	CTUe	4,12E+03	0,00E+00	1,44E+03	7,16E+02	1,39E+03	1,62E+02	4,06E+02
Użytkowanie gruntów	Pt	9,00E+02	0,00E+00	2,50E+02	3,78E+02	1,04E+02	5,30E+01	1,16E+02
Wyczerpywanie zasobów – zasoby wodne	m ³ depriv.	3,38E+03	-3,38E+00	3,61E+02	1,40E+00	1,93E+01	-1,57E+02	3,16E+03
Wyczerpywanie zasobów – surowce kopalne	MJ	-2,38E+03	0,00E+00	1,07E+03	4,88E+01	1,00E+02	-4,48E+03	8,76E+02
Wyczerpywanie zasobów – Surowce mineralne i metale	kg Sb eq	3,27E-03	0,00E+00	2,65E-03	3,17E-05	4,66E-04	6,42E-05	5,49E-05

że pozytywne jest oddziaływanie kategorii zużycia zasobów oraz wykorzystania odpadów polistyrenu. Wyniki po etapie ważenia można przedstawiać w postaci drzewa surowców i procesów (rys.1). Grubość strzałek związana jest z wielkością wpływu na środowisko, zatem w procesie produkcji soli sodowej pochodnej sulfonowej odpadów polistyre-

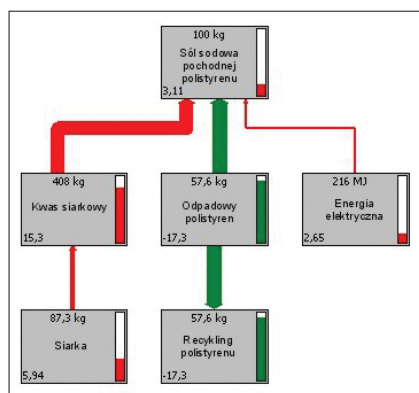
nowych decydującym czynnikiem potencjalnie obciążającym środowisko jest użycie do jego produkcji energii elektrycznej i kwasu siarkowego, a korzyścią dla środowiska jest wykorzystanie odpadów polistyrenu zamiast materiału pierwotnego – zielona strzałka (oraz wartość ujemna). Kwas siarkowy do produkcji flokulantu był użyty w nadmiarze, więc

w przypadku optymalizacji procesu produkcji można by zmniejszyć jego negatywny wpływ na środowisko. Na rysunku 1 przedstawiono sieć procesów w postaci jednego wskaźnika. Sieci procesów można również przedstawiać jako pojedynczy wskaźnik w odniesieniu do danej kategorii wpływu – np. zużycia wody, zakwaszania lub na zmianę klimatu.

Tabela 3. Wyniki po etapie ważenia dla soli sodowej pochodnej sulfonowej polistyrenu w odniesieniu do jednostki funkcjonalnej [mPt]. Źródło: opracowanie własne oraz Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie

Table 3. Results after the weighing stage for the sodium salt of polystyrene sulfone derivative in relation to the functional unit [mPt]

Kategoria wpływu	Suma	Sól sodowa pochodnej sulfonowej polistyrenu	Kwas siarkowy	Węglan wapnia	Węglan sodu	Odpady polistyrenu	Energia elektryczna
Zmiana klimatu	3,29E+00	4,87E+00	8,55E-01	6,61E-02	2,38E-01	-4,92E+00	2,19E+00
Zubożenie warstwy ozonowej	3,04E-03	0,00E+00	3,57E-03	3,62E-04	5,97E-04	-2,43E-03	9,42E-04
Promieniowanie jonizujące	5,01E-02	0,00E+00	3,10E-02	6,96E-03	4,03E-03	3,29E-03	4,86E-03
Fotocchemiczne powstawanie ozonu	3,36E-02	0,00E+00	4,49E-01	3,23E-02	3,64E-02	-6,78E-01	1,93E-01
Cząstki stałe	3,22E+00	0,00E+00	4,04E+00	5,88E-02	1,48E-01	-1,15E+00	1,29E-01
Zdrowie ludzkie, czynniki nierakotwórcze	2,68E-01	0,00E+00	1,23E-01	4,57E-03	3,37E-02	1,49E-03	1,04E-01
Zdrowie ludzkie, czynniki rakotwórcze	1,11E-01	0,00E+00	8,61E-02	5,95E-03	1,69E-02	-3,45E-02	3,61E-02
Zakwaszenie	5,11E+00	0,00E+00	4,89E+00	3,09E-02	1,59E-01	-6,03E-01	6,26E-01
Eutrofizacja wodna – woda słodka	2,27E-01	0,00E+00	3,31E-02	2,70E-03	1,81E-02	-1,71E-03	1,75E-01
Eutrofizacja wodna – woda morską	2,07E-02	0,00E+00	4,82E-02	1,34E-02	1,70E-02	-1,37E-01	7,88E-02
Eutrofizacja lądowa	1,04E-01	0,00E+00	7,86E-02	2,42E-02	8,28E-02	-2,01E-01	1,20E-01
Ekotoksyczność dla wody słodkiej	1,85E+00	0,00E+00	6,49E-01	3,22E-01	6,27E-01	7,28E-02	1,83E-01
Użytkowanie gruntów	8,72E-02	0,00E+00	2,42E-02	3,66E-02	1,00E-02	5,14E-03	1,12E-02
Wyczerpywanie zasobów – zasoby wodne	2,51E+01	-2,51E-02	2,68E+00	1,04E-02	1,44E-01	-1,16E+00	2,34E+01
Wyczerpywanie zasobów – surowce kopalne	-3,04E+00	0,00E+00	1,37E+00	6,25E-02	1,28E-01	-5,73E+00	1,12E+00
Wyczerpywanie zasobów – Surowce mineralne i metale	3,88E+00	0,00E+00	3,15E+00	3,76E-02	5,53E-01	7,62E-02	6,51E-02



Rysunek 1. Drzewo surowców i procesów produkcji soli sodowej pochodnej sulfonowej odpadów polistyrenu. Źródło: opracowanie własne oraz Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie

Figure 1. Tree diagram of raw materials and production processes of sodium salt sulfonate derivative of polystyrene waste

W tabeli 3 przedstawiono wyniki po etapie ważenia w kategoriach wpływu. Wyniki we wszystkich kategoriach wpływu wyrażone są w jednostce mPt (mili Pt, Pt – ang. point). Ślad środowiskowy produkcji 100 kg soli sodowej pochodnej sulfonowej polistyrenu to 40,31 mPt. „Wejścia” do systemu, których wpływ na środowisko podczas produkcji jest większy niż 5% to: energia elektryczna (28,5mPt, 70,7%), kwas siarkowy (18,5mPt, 45,9%), emisje podczas produkcji (4,8mPt, 12%), węglan sodu (2,2mPt, 5,5%) oraz odpady polistyrenu, jako korzyść środowiskowa (-) 14,5mPt, (-35,9%). W największym stopniu, produkcja flokulantu wpływa na kategorie: użycie wody (62%), wykorzystywanie zasobów, surowce mineralne i metale (9,6%), zakwaszenie (12,7%), zmiana klimatu (8,2%) oraz cząstki stałe (8%). W przypadku kategorii wyczerpywanie zasobów – surowce kopalne, zauważalna jest korzyść dla środowiska wynikająca z zagospodarowania odpadów polistyrenu – (-)7,6%.

Podsumowanie

Analiza cyklu życia jest więc narzędziem diagnostycznym przydatnym w zarządzaniu środowiskowym. W efekcie stosowania LCA zarządzający przedsiębiorstwem identyfikują obszary, które są źródłem szczególnych obciążeń dla środowiska lub zdrowia ludzi. Analiza metodą LCA, w przeciwieństwie do tradycyjnych metod zarządzania środowiskiem, pozwala między innymi na porównanie alternatywnych produktów i technologii wytwarzania, identyfikację miejsc generujących największy wpływ na środowisko w całym cyklu życia, ustanawianie kryteriów dla eko-etykiet, w celu identyfikacji produktów najlepszych ekologicznie, porównanie alternatywnych sposobów utylizacji odpadów [10].

Możliwość oceny produktu „od narodzin do śmierci” (from cradle to grave) sprawia, iż nie zostaje pominięty żaden etap istnienia wyrobu, co umożliwia dokonanie pełnych porównań określających zagrożenia środowiskowe przez niego stwarzane. To nowe podejście, skupiające uwagę na produkcie pozwala na eliminowanie przyczyn powstawania zanieczyszczeń środowiskowych, a nie jak dotychczas „naprawę” ich skutków [11]. Prowadzenie badań i analiz techniką LCA pozwoli na efektywniejsze gospodarowanie zasobami zarówno pod względem ekologicznym jak i ekonomicznym, gdyż bazuje na rzeczywistych danych wejściowych i wyjściowych wybranego procesu. Kompleksowy charakter LCA, umożliwiający porównywanie poszczególnych wyrobów, może wyznaczyć standardy, które w dobie globalizacji będą decydować o międzynarodowej ekologicznej konkurencyjności danego wyrobu. Szczególne znaczenie LCA może mieć przy wyznaczaniu kierunku zastosowań wyrobów stosowanych jako termoizolacje, między innymi w instalacjach systemów grzewczych, zastosowana jako analiza porównawcza produktów.

Podziękowanie: Pracę zrealizowano z subwencji Politechniki Częstochowskiej.

LITERATURA

- [1] Łunarski J., Systemy zarządzania środowiskowego, Wyd. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2006.
- [2] Kulczycka J. Ekonomiczna ocena cyklu życia (LCA) nową techniką zarządzania środowiskowego, Wyd. Akademia Ekonomiczna, Kraków 2004.
- [3] Kramer M., Brauweiler J., Nowak Z., Międzynarodowe zarządzanie środowiskiem. T. 2, Instrumenty i systemy zarządzania, C.H. Beck, Warszawa 2005, s. 185.
- [4] Bajdur W.M., Useage possibilities of product's life cycle environmental assesment in environmental and work safety management, w: Kurzak L.(red.) Production and services processes, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2006.
- [5] Ozdoba J. Ekoinnowacyjność polskiej gospodarki, Polska Izba Ekologii, Katowice 2015, www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2015/T1/t1_0151.pdf 10.07.2018
- [6] Zalecenie KE z dnia 9 kwietnia 2013 r. w sprawie stosowania wspólnych metod pomiaru efektywności środowiskowej w cyklu życia produktów i organizacji oraz informowania o niej (2013/179/UE)
- [7] Bajdur W. M., Hendlik A., Skowron-Grabowska B., Iwaszczuk N., LCA application in the assessment of new technologies of industrial effluents treatment, Desalination and Water Treatment, 57, 3, 2016.
- [8] Bajdur W.M., Eko-polielektrolity syntetyczne redukujące ładunki zanieczyszczeń w ściekach i wodach przemysłowych, Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 2011.
- [9] Sprostowanie do zalecenia Komisji (UE) 2021/2279 z dnia 15 grudnia 2021 r. w sprawie stosowania metod oznaczania śladu środowiskowego do pomiaru efektywności środowiskowej w cyklu życia produktów i organizacji oraz informowania o niej (Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 471 z dnia 30 grudnia 2021 r.), Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 144/2 z dnia 23 maja 2022 r., str. 29-30
- [10] Kowalski Z., Generowicz A., Makara A., Kulczycka J., Evaluation of municipal waste landfilling using the technology quality assessment method, Environment Protection Engineering Vol. 41, Issue 4, 2015, Pages 167-179.
- [11] Kowalski Z., Kulczycka J., Góralczyk M., Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA), Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2007.