

Krystyna CZAPLICKA-KOLARZ
Politechnika Śląska
Wydział Organizacji i Zarządzania
Instytut Zarządzania, Administracji i Logistyki
kczaplicka@polsl.pl

Jerzy KOROL, Mariusz KRUCZEK
Główny Instytut Górnictwa
jkorol@gig.eu, mkruczek@gig.eu

ZNACZENIE ZARZĄDZANIA CYKLEM ŻYCIA W GOSPODARCE O OBIEGU ZAMKNIĘTYM NA PRZYKŁADZIE TWORZYW POLIMEROWYCH

Streszczenie. Celem gospodarki o obiegu zamkniętym jest stworzenie systemu przepływu materiałów zgodnego z ideą „od kołyski do kołyski” (*from cradle to cradle*). Podejście takie wiąże się z zarządzaniem cyklem życia produktów w odniesieniu do wszystkich etapów, począwszy od wydobycia aż po pełne wykorzystanie wszystkich odpadów, które zgodnie z koncepcją tej gospodarki stanowią surowce dla innych procesów technologicznych. W artykule przedstawiono różne warianty zagospodarowania odpadów z tworzyw sztucznych i ich ocenę pod kątem wpływu na środowiskowo. Spośród analizowanych wariantów zagospodarowania najkorzystniejszym – ze środowiskowego punktu widzenia – jest recykling materiałowy, który stanowi również preferowane rozwiązanie w gospodarce o obiegu zamkniętym.

Słowa kluczowe: analiza cyklu życia, gospodarka o obiegu zamkniętym, odpady tworzyw sztucznych

SIGNIFICANCE OF LIFE CYCLE MANAGEMENT IN THE CIRCULAR ECONOMY ON THE EXAMPLE OF POLYMER

Abstract. The aim of the circular economy is to create a system based on the flow of materials compatible with the idea of “from cradle to cradle”. This approach involves managing the life cycle of products in all stages from exploration through to full utilization of all waste, according to the concept of circular economy wastes are the raw materials for other processes. The paper presents various options of plastic waste management. The different variants of plastic waste management were assessed for their impact on the environment. Among the analyzed options of plastic

waste management, the most advantageous from the environmental point of view, is material recycling. Recycling is also the most preferred method of waste management in the circular economy.

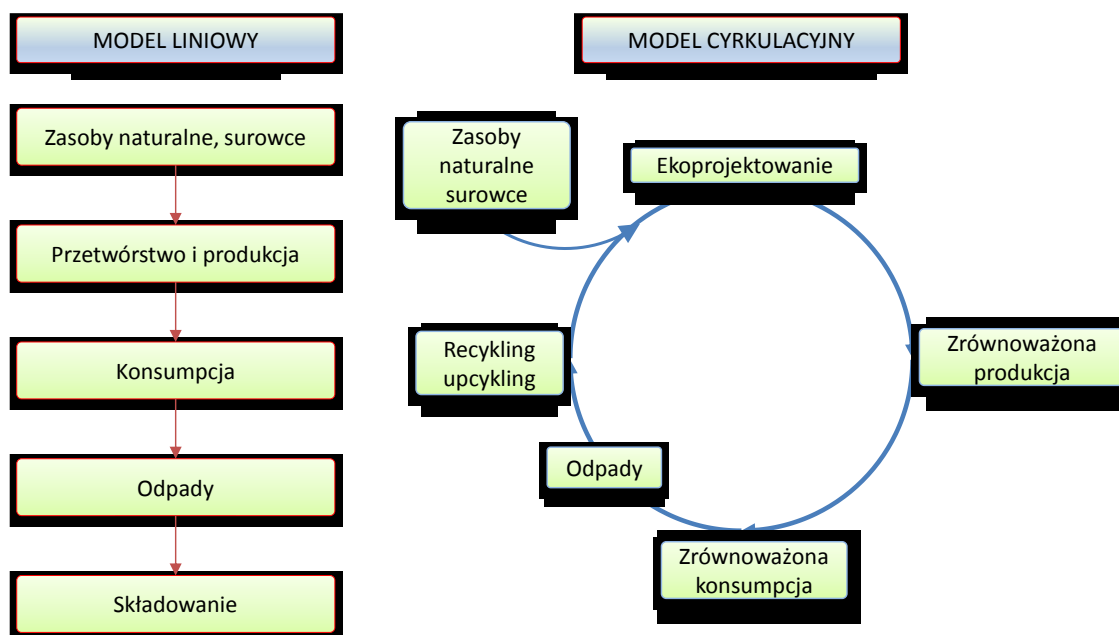
Keywords: life cycle assessment, the circular economy, waste plastics

1. Wprowadzenie

Gospodarka o obiegu zamkniętym (cyrkularna) jest to forma gospodarki, której celem jest zmniejszenie ilości powstających odpadów do minimum, a nawet do zera i w której projektowanie poszczególnych elementów produktu powinno uwzględniać możliwość ich demontażu, przetworzenia i ponownego wykorzystania. Priorytetem gospodarki o obiegu zamkniętym jest efektywne wykorzystywanie zasobów. Podstawową cechą gospodarki cyrkularnej jest podejście systemowe, zgodnie z którym produkt jest jednym z elementów cyklu życia, w którym analizuje się również etap przetwarzania i wielokrotnego wykorzystania. Zgodnie z założeniami Fundacji Ellen MacArthur podstawowym celem gospodarki cyrkularnej jest używanie surowców, a nie ich zużywanie oraz przetwarzanie produktów po zakończonej fazie użytkowania¹. Gospodarka o obiegu zamkniętym promowana jest przez wiele organizacji, w tym m.in. przez stowarzyszenie Plastic Europe², które opublikowało rekomendacje dla producentów tworzyw sztucznych w sprawie planowanego nowego pakietu propozycji dotyczących gospodarki o obiegu zamkniętym i wezwało do ustanowienia do 2025 roku zakazu składowania dla nadających się do recyklingu i odzysku odpadów pokonsumpcyjnych jako podstawowego warunku umożliwiającego poprawę efektywności wykorzystania zasobów. W tym kontekście znany dotychczas model gospodarki liniowej, przedstawiający cykl życia produktu od wydobycia surowców do powstania odpadów, okazuje się być niewystarczający ze względu na pojawiające się problemy ze wzrastającą ilością odpadów na składowiskach. Dlatego należy dążyć do zrównoważonego gospodarowania zasobami, które oferuje gospodarka cyrkulacyjna. Założenia gospodarki o obiegu zamkniętym i jej porównanie z modelem gospodarki liniowej przedstawiono na rys. 1.

¹ Report: Toward the circular economy, Accelerating the scale – up, across global supply chain, Part 3. Ellen MacArthur Foundation, 2014.

² Tworzywa sztuczne – Fakty 2015. Analiza produkcji, zapotrzebowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie. http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151123112635-fakty_o_tworzywach_2015_pl.pdf, 10.12.2016.



Rys. 1. Porównanie modelu liniowego z modelem gospodarki o obiegu zamkniętym

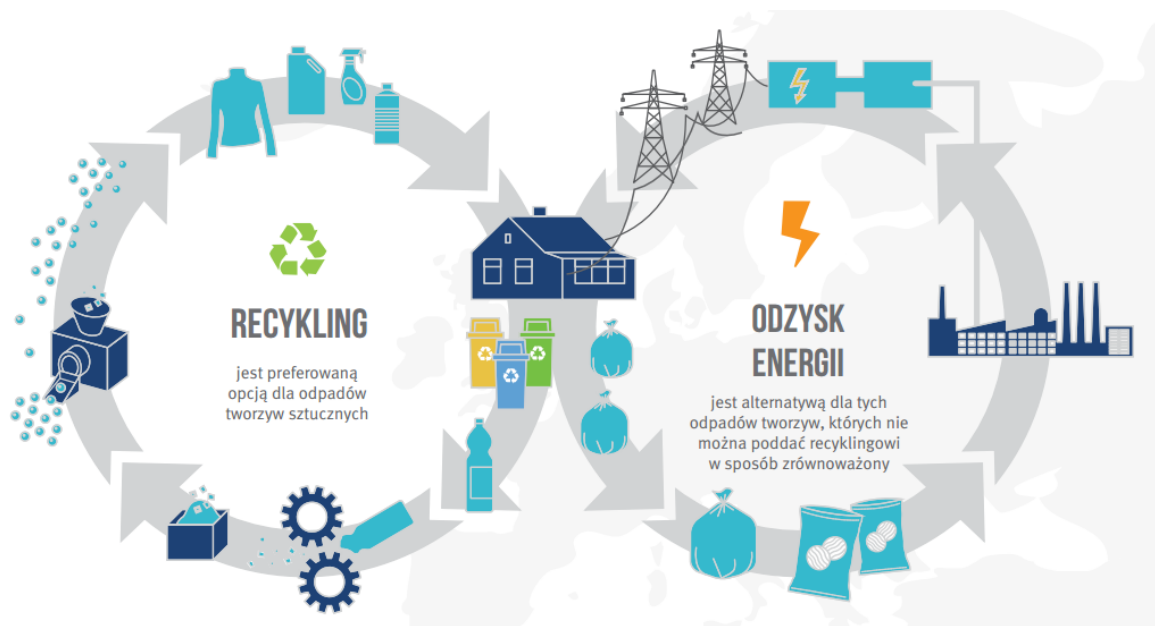
Źródło: Korol J.: Ocena śladów środowiskowych na przykładzie biokompozytów i tworzyw polimerowych. Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2016.

Gospodarka o obiegu zamkniętym wpływa na utrzymanie w długiej perspektywie czasowej wysokiej wartości dodanej produktów, co wiąże się ze skutecznością i efektywnością wielokrotnego wykorzystania produktów. Wprowadzenie podejścia bazującego na wielokrotnym wykorzystaniu zasobów powoduje konieczność ustalenia wielu zmian w każdej fazie przepływu produktu – od etapu projektowania do nowych sposobów przetwarzania odpadów w produkty. Wiąże się to również z tworzeniem nowych modeli biznesowych. Gospodarka o obiegu zamkniętym stanowi wyzwanie dla przemysłu tworzyw sztucznych, gdzie szczególnego znaczenia nabiera problem surowców nieodnawialnych, będących podstawą do ich wytwarzania. Po okresie użytkowania wyroby powstające z tworzyw sztucznych stają się odpadem, który może być zawrócony do obiegu materiałów w procesie recyklingu materiałowego, o ile pozwala na to technologia lub rachunek ekonomiczny. Jeżeli natomiast z technologicznego lub ekonomicznego punktu widzenia nie ma możliwości odzyskania materiałów, to odpady z tworzyw sztucznych kierowane są do odzysku energii. Poziom zrównoważonego recyklingu tworzyw sztucznych w krajach Unii Europejskiej waha się w przedziale od 45% do 50%³. Pozostałe 50-55% powinno być poddawane odzyskowi energii w przemysłowych instalacjach do spalania i współspalania⁴. Odpady tworzyw sztucznych (OTS) stanowią ważne zasoby dla gospodarki o obiegu zamkniętym, gdyż są

³ Report: Criteria for eco-efficient (sustainable) plastic recycling and waste management. denkstatt GmbH, Austria 2014.

⁴ Tworzywa sztuczne – Fakty 2015, <http://www.plasticseurope.pl/Document/tworzywa---fakty-2016.aspx?Page=DOCUMENT&FolIID=2>, 28.12.2016.

wsadem surowcowym dla innych produktów. Na rys. 2 przedstawiono preferowane warianty zagospodarowania OTS, zgodne z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym.



Rys. 2. Warianty zagospodarowania odpadów tworzyw sztucznych w gospodarce o obiegu zamkniętym
 Źródło: Tworzywa sztuczne – Fakty 2015. Analiza produkcji, zapotrzebowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie, http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151123112635-fakty_o_tworzywach_2015_pl.pdf, 10.12.2016.

2. Rola zarządzania cyklem życia w domykaniu obiegu materiałów

Zarządzanie cyklem życia pozwala na ograniczanie i zapobieganie powstawaniu obciążeń środowiskowych związanych z odpadami czy też emisją zanieczyszczeń. Jest to możliwe dzięki uwzględnieniu w ocenie oddziaływania na środowisko zarówno wszystkich etapów cyklu życia, jak i istotnych kategorii wpływających na środowisko. Zastosowanie analizy cyklu życia umożliwia kwantyfikację zużycia zasobów, dzięki czemu można w sposób ilościowy ocenić jak poszczególne technologie czy produkty wpływają na środowisko we wszystkich fazach cyklu życia. Uwzględnienie wszystkich faz pozwala na uniknięcie efektu przesuwania zanieczyszczeń z jednej fazy do innej czy też przenoszenia obciążeń środowiskowych – przykładowo z etapu budowy na etap eksploatacji czy likwidacji. Często produkty, które na etapie budowy czy produkcji mają niskie wskaźniki środowiskowe w fazie użytkowania są wysoce energochłonne lub na etapie likwidacji wymagają wielu energochłonnych operacji, które pozwalają na ich recykling. Stąd też wnioskować można, że kompleksowa ocena cyklu życia produktu umożliwia wskazanie obciążeń środowiskowych poszczególnych etapów cyklu życia produktu poddawanego analizie.

Zarządzanie cyklem życia nabiera zatem szczególnego znaczenia w przypadku domykania obiegów, gdyż produkty analizowane są na każdym etapie ich powstawania, wytwarzania, eksploatacji i utylizacji. Stosowanie środowiskowej oceny cyklu życia LCA (Life Cycle Assessment) w gospodarce o obiegu zamkniętym umożliwia wybór produktów czy technologii o najwyższej efektywności środowiskowej. Dzięki zastosowaniu techniki LCA można ilościowo oszacowywać korzyści z wykorzystywania surowców pochodzących z recyklingu, uwzględniając również obciążenia związane z ich przygotowaniem do recyklingu. Analiza cyklu życia pozwala na ocenę potencjalnego wpływu na środowisko w całym cyklu życia, od pozyskania surowców, przez eksploatację, aż do etapu likwidacji. LCA jest przedmiotem norm związanych z systemem zarządzania środowiskowego PN-EN ISO 14040:2009⁵ oraz PN-EN ISO 14044:2009⁶, wiążącym kwestie zużycia surowców i energii oraz bezpośrednich emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych z efektami dla środowiska, w tym takimi jak emisje gazów cieplarnianych, wyczerpywanie paliw kopalnych, metali itd. Metoda oceny cyklu życia LCA oferuje liczne możliwości i rozwiązania, które powodują, że jest stosowana w wielu sektorach gospodarki w przeprowadzaniu ocen środowiskowych. Metoda LCA zazwyczaj wykorzystywana jest do oceny środowiskowej technologii czy procesu produkcji produktu w granicach systemu „od kołyski do bramy” (*from cradle to gate*) lub „od kołyski do grobu” (*from cradle to grave*). Według koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym analizy cyklu życia powinny obejmować granice systemu „od kołyski do kołyski” (*from cradle to cradle*)⁷.

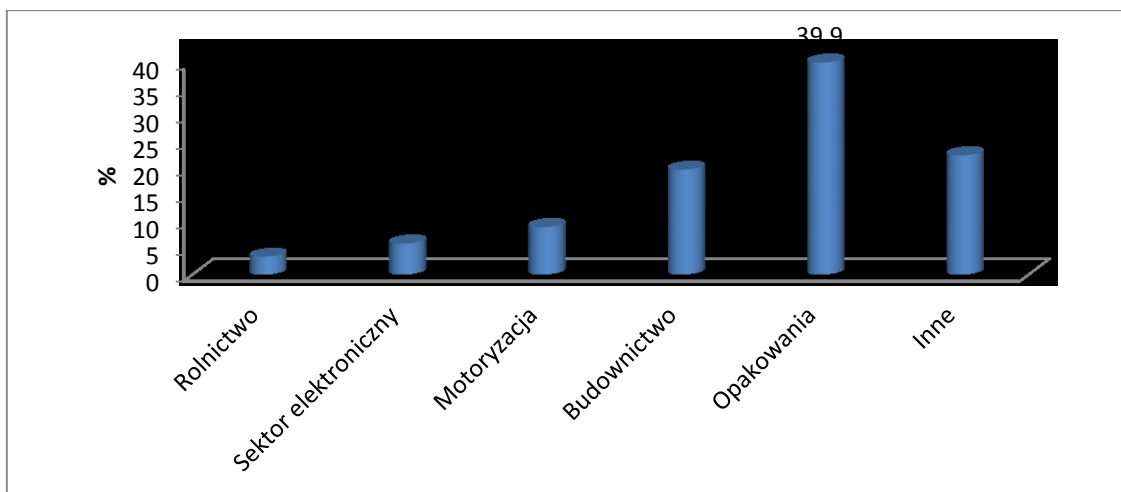
3. Zagospodarowanie odpadów tworzyw polimerowych w gospodarce o obiegu zamkniętym

Raporty Plastics Europe (The Association of Plastics Manufacturers in Europe) i EPRO (The European Association of Plastics Recycling and Recovery Organisations) wskazują, że zarówno produkcja, jak i ilość odpadów z tworzyw polimerowych stale wzrasta. Zużycie tworzyw sztucznych w Europie w 2015 roku wyniosło 49 mln Mg. Na rys. 3 przedstawiono udział poszczególnych branż w europejskim rynku tworzyw sztucznych.

⁵ PN-EN ISO 14044:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura.

⁶ PN-EN ISO 14044:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne.

⁷ Burchart-Korol D.: Zrównoważone zarządzanie zasobami naturalnymi bazując na gospodarce cyrkulacyjnej. Zeszyty Naukowe, s. Organizacja i Zarządzanie, z. 87. Politechnika Śląska, Gliwice 2016.



Rys. 3. Udział w zużyciu tworzyw sztucznych w Europie w 2015 roku

Źródło: Tworzywa sztuczne – Fakty 2015. Analiza produkcji, zapotrzebowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie, http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151123112635-fakty_o_tworzywach_2015_pl.pdf, 10.12.2016.

W Europie obok głównych sektorów, w których wykorzystywane są tworzywa sztuczne ponad 20% stanowi grupa „inne”, do której należą sektory dostarczające artykuły gospodarstwa domowego, meble, sport, ochronę zdrowia i bezpieczeństwo. Natomiast w Polsce w 2015 roku zapotrzebowanie na tworzywa sztuczne wyniosło 3,1 mln Mg, co stanowi wzrost o 3,3% w porównaniu z rokiem poprzednim. Zauważyć można rosnący trend w zużyciu tej grupy surowców. Udział tworzyw polimerowych w Polsce wynosi blisko 6,3% z łącznego zapotrzebowania europejskiego, kształtującego się na poziomie 49 mln Mg. W tym względzie Polska jest na szóstym miejscu pod względem zapotrzebowania na tworzywa w Europie, po Niemczech, Włoszech, Francji, Hiszpanii i Wielkiej Brytanii. Całkowite zużycie tworzyw w 2015 roku w Polsce obejmuje: opakowania – 31,5%, budownictwo – 25,6%, motoryzację – 9%, sektor elektroniczny – 6,1% oraz inne – 27,8%. Ze względu na rodzaj polimeru struktura zużycia tworzyw w Polsce kształtuje się następująco: polietylen (LDPE, LLDPE, HDPE) około 30%, polipropylen – 18%, polichlorek winylu – 14%, polistyren – 14%⁸.

W Europie odzysk odpadów tworzyw sztucznych w 2014 roku wyniósł 69,2%, z czego w odpadach pochodzących z gospodarstw domowych (komunalnych) znalazło się 25,8 mln Mg zużytych tworzyw sztucznych. W procesach recyklingu i odzysku energii zostało odzyskane 69,2% (w tym recykling 29,7%, natomiast odzysk energii z odpadów tworzyw sztucznych 39,5%), pozostałe 30,8% trafiło na składowiska. Analizując coroczne raporty wymienionych wyżej organizacji można zauważyć, że od kilku lat recykling jak również odzysk energii z tworzyw sztucznych stale wzrasta. Mimo że udział składowania w sposobach zagospodarowania odpadów tworzyw sztucznych maleje, to nadal w wielu europejskich krajach

⁸ Dane ilościowe ustalono bazując na raporcie: Tworzywa sztuczne – Fakty 2015. Analiza produkcji, zapotrzebowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie, http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151123112635-fakty_o_tworzywach_2015_pl.pdf, 10.12.2016 oraz dane GUS.

jest to główny sposób ich zagospodarowania. Prawie 8 mln Mg odpadów tworzyw sztucznych było składowane na wysypiskach w Europie w 2014 roku. Zaniechanie składowania odpadów pochodzących z tworzyw sztucznych powinno (w opinii ekspertów) przynieść wiele korzyści zarówno ekonomicznych, jak i środowiskowych⁹.

W Polsce zagospodarowanie pokonsumpcyjnych odpadów tworzyw sztucznych w 2014 roku wyniosło 15,4 mln Mg¹⁰, w tym aż 56% stanowiło składowanie, 19% odzysk, natomiast najbardziej preferowany sposób zagospodarowania tworzyw – recykling – wyniósł tylko 25%. Największy poziom recyklingu w 2014 roku wykazano w sektorze opakowaniowym (41% ogółu odpadów tworzyw sztucznych poddanych recyklingowi), co stanowiło 343 Mg opakowaniowych odpadów tworzyw sztucznych¹¹.

4. Analiza cyklu życia zagospodarowania odpadów tworzyw sztucznych

Głównymi, preferowanymi opcjami zagospodarowania odpadów tworzyw sztucznych są recykling oraz odzysk energii. Dla przeprowadzenia analizy wpływu na środowisko różnych form zagospodarowania odpadów przyjęto następujące warianty: recykling materiałowy (W1), odzysk energii (W2) oraz składowanie odpadów (W3)¹².

Dla przeprowadzenia analizy wpływu na środowisko głównych sposobów zagospodarowania OTS wykorzystano technikę oceny cyklu życia LCA (Life Cycle Assessment), która pozwala na skwantyfikowanie obciążeń środowiskowych związanych z zagospodarowaniem OTS. Na rys. 4 przedstawiono analizowane warianty zagospodarowania OTS.

W badaniach jako jednostkę funkcjonalną przyjęto 1 kg odpadów przeznaczonych do zagospodarowania. Opierając się na źródłach literaturowych¹³ przyjęto, że z 1 kg OTS:

- w recyklingu materiałowym można uzyskać 0,9 kg surowca do powtórnego wykorzystania w procesach przetwórstwa tworzyw sztucznych (W1),
- można odzyskać 4,11 MJ w postaci energii elektrycznej (W2).

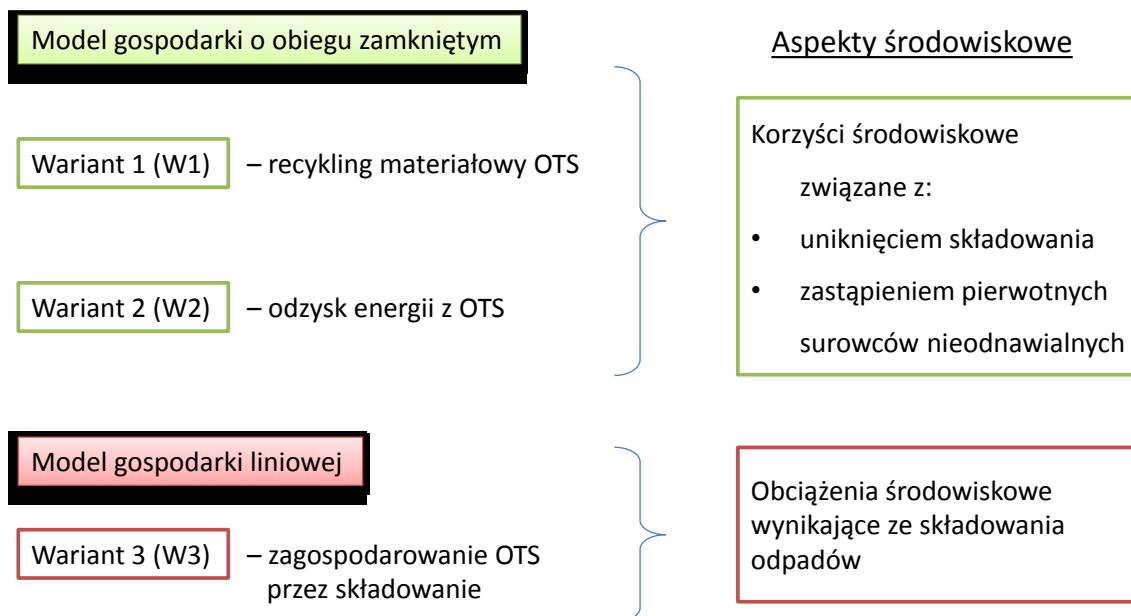
⁹ Ibidem.

¹⁰ Według GUS-u.

¹¹ Tworzywa sztuczne – Fakty 2015. Analiza produkcji, zapotrzebowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie, http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151123112635-fakty_o_tworzywach_2015_pl.pdf.

¹² Na składowiska trafia ponad 30% ogólnej masy OTS.

¹³ Huysman S., Debaveye S., Schaubroeck T., De Meester S., Ardente F., Mathieux F., Dewulf J.: The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in Flanders “Resources, Conservation and Recycling”, No. 101, 2015, p. 53-60.



Rys. 4. Warianty zagospodarowania OTS

Źródło: Opracowanie własne.

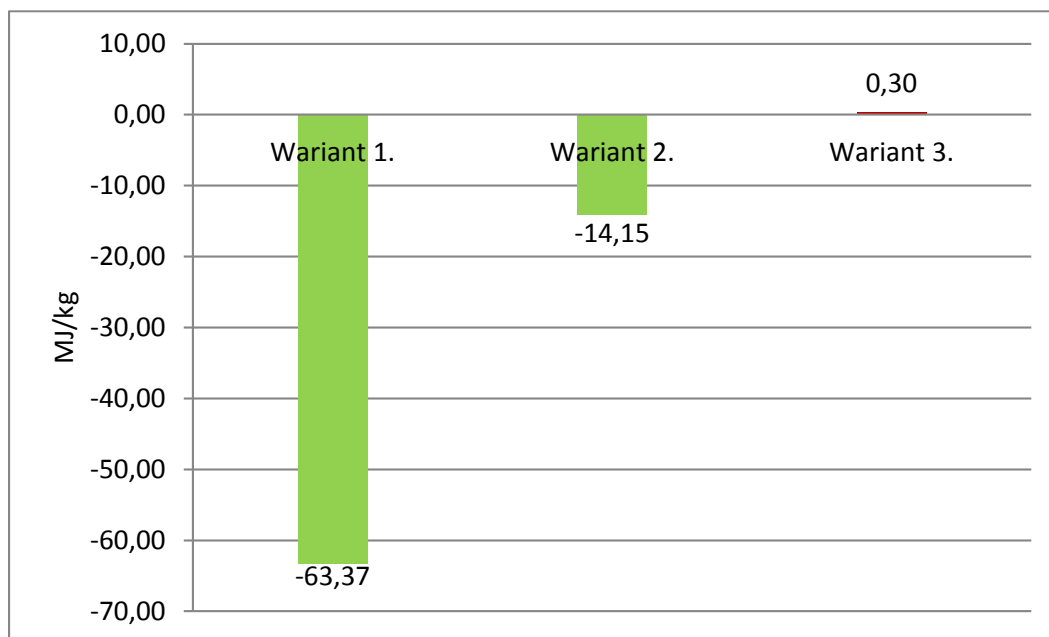
Do analiz wykorzystano dane z bazy Ecoinvent oraz następujące metody oceny cyklu życia:

- skumulowanego zapotrzebowania na energię nieodnawialną (CED – *Cumulative Energy Demand*), wskaźnik CExD jest wyrażony w MJ¹⁴. Metoda ta została wykorzystana do analiz ze względu na dominujący w paradygmacie gospodarki o obiegu zamkniętym nacisk na minimalizację zużycia surowców nieodnawialnych. Metoda CED umożliwia ocenę wpływu analizowanej technologii czy produktu na zużycie surowców nieodnawialnych.
- IPCC, która służy do oceny wpływu na emisję gazów cieplarnianych. Metoda IPCC umożliwia ilościową ocenę wpływu poszczególnych gazów cieplarnianych (GHG – *greenhouse gases*) na efekt cieplarniany, w odniesieniu do CO₂, wskaźnik jest wyrażony jako ekwiwalent CO₂¹⁵.

Na rysunkach od 5 do 7 przedstawiono wyniki środowiskowej oceny cyklu życia dla analizowanych wariantów zagospodarowania tworzyw.

¹⁴ Deutscher V.: VDI-richtlinie 4600: Cumulative Energy Demand, Terms, Definitions, Methods of Calculation. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1997.

¹⁵ IPCC Climate Change Fifth Assessment Report: Climate Change 2013, www.ipcc.ch.



Rys. 5. Ocena zapotrzebowania na energię nieodnawialną, metoda CED

Źródło: Opracowanie własne.

Analizując wpływ poszczególnych wariantów zagospodarowania OTS na wykorzystanie surowców nieodnawialnych, można stwierdzić, że najkorzystniejszym sposobem zagospodarowania OTS jest recykling materiałowy. Wyniki o ujemnej wartości dla W1 i W2 wskazują na korzyści środowiskowe związane z zastąpieniem surowców pierwotnych odpadami i uniknięciem negatywnych skutków środowiskowych. W wariacie W1 unika się obciążeń środowiskowych związanych z wytworzeniem 0,9 kg tworzyw sztucznych z wykorzystaniem surowców nieodnawialnych. Do analiz jako przykładowe tworzywo wytworzone z surowców pierwotnych wykorzystano produkcję 0,9 kg polipropylenu. W wariacie W2 unika się wpływu produkcji 4,11 MJ energii elektrycznej z wykorzystaniem paliw kopalnych (analizy wykonano dla polskiego miksu energetycznego). Natomiast wariant W3, czyli składowanie odpadów, charakteryzuje się niekorzystnym wpływem na środowisko, uwzględniając wykorzystanie zasobów nieodnawialnych. Na tej podstawie wywnioskować można, że recykling OTS przyczynia się w największym stopniu do minimalizacji zużycia zasobów nieodnawialnych. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki analiz wpływu poszczególnych wariantów zagospodarowania OTS na emisję gazów cieplarnianych.



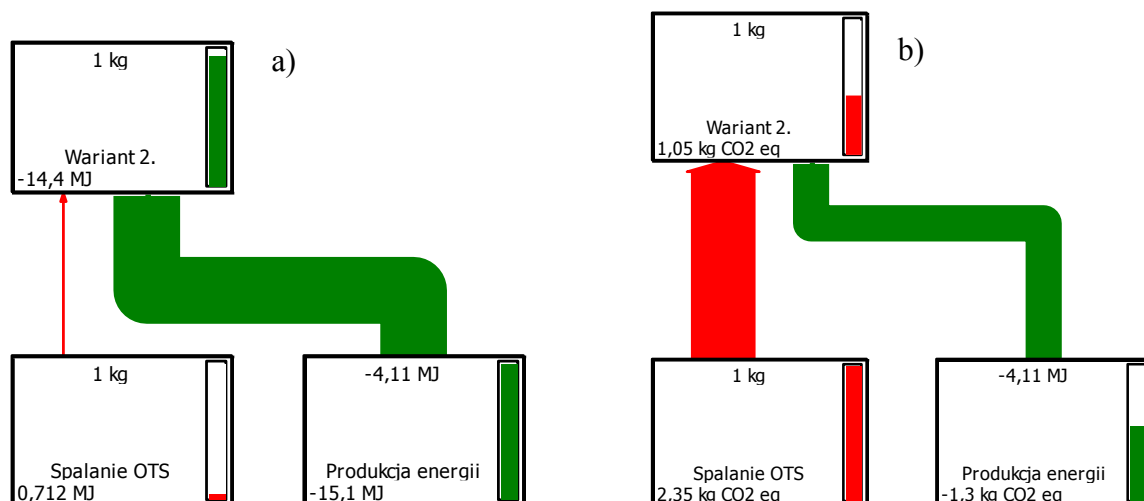
Rys. 6. Ocena emisji gazów cieplarnianych, metoda IPCC

Źródło Opracowanie własne.

Na podstawie analizy wpływu poszczególnych wariantów zagospodarowania OTS na emisje gazów cieplarnianych wykazano, że najkorzystniejszym sposobem zagospodarowania OTS jest recykling materiałowy, który charakteryzuje się ujemnym wynikiem – są to tzw. *environmental credits*¹⁶, które można rozumieć jako korzyści środowiskowe. Recykling materiałowy pozwala uniknąć obciążeń środowiskowych związanych z emisją gazów cieplarnianych odpowiadającej 1,83 kg CO₂ eq, która jest emitowana do atmosfery podczas produkcji 0,9 kg polipropylenu z surowców pierwotnych.

W przypadku emisji gazów cieplarnianych pozostałe analizowane warianty W2 i W3 charakteryzują się negatywnym wpływem na środowisko i przyczyniają się do emisji gazów cieplarnianych. W wariancie W2 pomimo uniknięcia wpływu produkcji 4,11 MJ energii elektrycznej (bazując na polskim miksie energetycznym) z wykorzystaniem paliw kopalnych, emisja gazów cieplarnianych wynosi 1,05 kg CO₂ eq. Wariant W3 pomimo niekorzystnego wpływu na środowisko cechuje się, z punktu widzenia emisji gazów cieplarnianych, znacznie mniejszą wartością, odpowiadającą 0,1 kg CO₂ eq. Na rysunku 7 przedstawiono udział unikniętych obciążeń środowiskowych (kolor zielony) i negatywny wpływ na środowisko (kolor czerwony) dla wariantu W2, zgodnie z metodami CED i IPCC.

¹⁶ Huysman S., Debaveye S., Schaubroeck T., De Meester S., Ardente F., Mathieux F., Dewulf J.: The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in Flanders. "Resources, Conservation and Recycling", No. 101, 2015, p. 53-60.



Rys. 7. Ocena cyklu życia odzysku energii z OTS, a) metoda CED, b) metoda IPCC
Źródło: Opracowanie własne.

Na podstawie uzyskanych wyników wykazano, że recykling materiałowy przynosi największe korzyści środowiskowe. Wynika to przede wszystkim z ograniczenia obciążeń środowiskowych związanych z produkcją tworzyw z surowców pierwotnych, co ma wpływ na ujemne wskaźniki zużycia paliw kopalnych oraz emisji gazów cieplarnianych. W przypadku odzysku energii z OTS, mimo że dostarcza ona korzyści dla środowiska w związku z uniknięciem produkcji energii z paliw kopalnych, to wpływ na emisje gazów cieplarnianych ze spalania OTS jest niemal dwukrotnie wyższy, co w efekcie prowadzi do większego negatywnego wpływu na środowisko.

5. Podsumowanie

Zgodnie z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym zarządzanie cyklem życia tworzyw sztucznych obejmuje ocenę wpływu na środowisko tworzyw na każdym etapie, ze szczególnym uwzględnieniem etapu końca życia, gdzie recykling i odzysk energii są głównymi kierunkami dla efektywnego zagospodarowania odpadów tworzyw sztucznych. Model gospodarki o obiegu zamkniętym zakłada wydłużanie cyklu życia przez wielokrotne używanie, naprawy oraz recykling. Zarządzanie cyklem życia tworzyw sztucznych wpisuje się w nowy model gospodarowania, gdyż wskazuje korzyści płynące z etapu końca życia, gdzie odpad staje się surowcem przynoszącym wartość dodaną dla nowego produktu.

Dotychczas odzysk energii z OTS w Europie jest dużo wyższy niż recykling. Ocena techniką LCA wskazuje, że należy stopniowo odstąpić od tego sposobu zagospodarowania na rzecz recyklingu. Recykling umożliwia uzyskanie dodatkowych korzyści środowiskowych,

związanych z ograniczeniem zapotrzebowania na surowce pierwotne, szczególnie paliwa kopalne.

Wszelkie rozwiązania związane z wprowadzaniem paradygmatu gospodarki cyrkularnej wymagają przede wszystkim sprawnej i efektywnej realizacji przepływów materiałowych i informacyjnych. Szczególnie istotne jest to w kontekście ograniczonego dostępu do zasobów oraz rozwoju systemów logistyki zwrotnej.

Bibliografia

1. Burchart-Korol D.: Zrównoważone zarządzanie zasobami naturalnymi bazując na gospodarce cyrkulacyjnej. Zeszyty Naukowe, s. Organizacja i Zarządzanie, z. 87. Politechnika Śląska, Gliwice 2016.
2. Deutscher V.: VDI-richtlinie 4600: Cumulative Energy Demand, Terms, Definitions, Methods of Calculation. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1997.
3. Huysman S., Debaveye S., Schaubroeck T., De Meester S., Ardente F., Mathieux F., Dewulf J.: The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in Flanders. "Resources, Conservation and Recycling", No. 101, 2015, p. 53-60.
4. IPCC Climate Change Fifth Assessment Report: Climate Change 2013, www.ipcc.ch.
5. PN-EN ISO 14044:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura.
6. PN-EN ISO 14044:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne.
7. Report: Criteria for eco-efficient (sustainable) plastic recycling and waste management. denkstatt GmbH, Austria 2014.
8. Report: Toward the circular economy, Accelerating the scale – up, across global supply chain, Part 3. Ellen MacArthur Foundation, 2014.
9. Tworzywa sztuczne – Fakty 2015. Analiza produkcji, zapotrzebowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie, http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151123112635-fakty_o_tworzywach_2015_pl.pdf.
10. Tworzywa sztuczne – Fakty 2015, <http://www.plasticseurope.pl/Document/tworzywa---fakty-2016.aspx?Page=DOCUMENT&FolID=2>.