

WPLYW NA ŚRODOWISKO PROCESU WSTĘPNEGO PRZYGOTOWANIA ODPADÓW OPAKOWANIOWYCH DO RECYKLINGU

Andrzej MARCINKOWSKI, Paweł HAREŹA

Politechnika Łódzka, Wydział Organizacji i Zarządzania,
Instytut Marketingu i Zrównoważonego Rozwoju

Streszczenie: Odpady opakowaniowe po produktach spożywczych mogą stanowić wartościowy surowiec wtórny po procesie recyklingu. Jednak ich wykorzystanie jest uzależnione od ich wstępnego przygotowania, które odbywa się w gospodarstwach domowych. Celem przeprowadzonych badań było określenie metodą oceny cyklu życia (LCA, *life cycle assessment*) korzyści środowiskowych wynikających z recyklingu materiałów opakowaniowych i porównanie ich ze stratą środowiskową związaną z procesem wstępnego przygotowania. Ponadto zostały wyznaczone wartości ekonomiczne różnych materiałów oraz kosztów ich przygotowania celem porównania aktualnych wyników z otrzymanymi dekadę wcześniej. Badania wpływu na środowisko zostały wykonane metodą ReCiPe *endpoint*. Uzyskane wyniki wskazały na niską opłacalność środowiskową recyklingu poprzedzonego wstępnym przygotowaniem odpadów. Relacja korzyści środowiskowej do strat była różna w zależności od analizowanego wariantu. Wykazano spadek opłacalności odzysku odpadów opakowaniowych w analizowanym okresie. Uzyskane wyniki można wykorzystać w planowaniu efektywnej gospodarki surowców wtórnych i projektowaniu uzasadnionych środowiskowo systemów selektywnej zbiórki odpadów.

Słowa kluczowe: odpady opakowaniowe, ocena cyklu życia (LCA), selektywna zbiórka, recykling

1. Wprowadzenie

Przez wieki wszystkie odpady wytwarzane przez człowieka podlegały biodegradacji. Wraz z rozwojem cywilizacji odkrywano nowe materiały, które początkowo w znikomy sposób oddziaływały na środowisko. Obecnie ludzkość wytwarza wiele niebiodegradowalnych związków chemicznych, a technologia umożliwia ich masowe przetwarzanie w celu produkcji wyrobów przy stosunkowo niskich kosztach. Szczególnie jest to widoczne w przypadku produktów wykonanych ze szkła i tworzyw sztucznych. Na przestrzeni ostatnich 50 lat rola i znaczenie tworzyw sztucznych stale rosły

(Marcinkowski i Kowalski 2012). Od lat 60. ubiegłego wieku światowa produkcja tworzyw sztucznych wzrosła dwudziestokrotnie do 322 mln ton w 2015 r. Zgodnie z prognozami przez kolejne dwadzieścia lat liczba ta ulegnie podwojeniu (European Commission 2018).

Szkło i tworzywa sztuczne są materiałami nieodnawialnymi. Takimi zasobami należy odpowiednio gospodarować, dlatego tak ważne jest wracanie materiałów do gospodarki w celu ich ponownego wykorzystania w procesach produkcyjnych (Marcinkowski i Kowalski 2012). W Polsce w latach 2015–2020 wytworzono średnio 12,1 mln ton odpadów komunalnych, z czego 3,5 mln ton (29,2%) zostało poddane selektywnej zbiórce. W analogicznym okresie przeciętny mieszkaniec Polski wytworzył ok. 316 kg odpadów komunalnych, przy czym ilość generowanych odpadów rosła o ok. 3,3% rok do roku (GUS 2021).

W tabeli 1 przedstawiono odsetek odpadów, takich jak papier i tektura, metale, szkło oraz tworzywa sztuczne, zebranych selektywnie w ciągu jednego roku w Polsce. Dane pochodzą z lat 2015–2020 i są zaprezentowane w relacji do ogółu odpadów komunalnych. Przeciętnie tylko 9,8% odpadów z papieru, metalu, szkła i tworzyw sztucznych zostało poddanych selektywnej zbiórce. Na uwagę zasługuje wzrost o prawie 3% ilości zebranych odpadów w 2020 r. względem 2019 r.

Tabela 1

Papier i tektura, metale, szkło i tworzywa sztuczne
zebrane selektywnie w latach 2015–2020
w relacji do ogółu odpadów komunalnych zebranych w ciągu roku

Rok	Odsetek selektywnie zebranych odpadów [%]
2015	9,1
2016	8,8
2017	8,4
2018	8,9
2019	10,5
2020	13,2

Źródło: (Główny Urząd Statystyczny 2021)

Recykling materiałowy pozwala zmniejszyć zapotrzebowanie na surowce pierwotne produkowane z ropy naftowej oraz ograniczyć zużycie energii i emisji dwutlenku węgla do atmosfery na etapie produkcji materiałów ropopochodnych (Czarnecka-Komorowska i Wiszumirska 2020).

W Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej z dnia 14 czerwca 2018 r. zostały opublikowane dyrektywy dotyczące odpadów, w których zawarto między innymi cele gospodarki odpadami, a także wymagania przybliżające przejście z modelu gospodarki

linearnej na model gospodarki cyrkularnej. Celem zmian jest zmniejszenie ilości wytwarzanych odpadów, a zarazem wzrost udziału odpadów podlegających recyklingowi. Opublikowane przez Parlament Europejski i Radę UE dyrektywy to: dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/850 z dnia 30 maja 2018 r., zmieniająca dyrektywę 1999/31/WE w sprawie składowania odpadów, dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/851 z dnia 30 maja 2018 r., zmieniająca dyrektywę 2008/98/WE w sprawie odpadów oraz dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/852 z dnia 30 maja 2018 r., zmieniająca dyrektywę 94/62/WE w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych. Dyrektywy zawierają przepisy, których obowiązywanie ma prowadzić do redukcji ilości powstających odpadów, a także promować wśród państw członkowskich uchwalanie planów gospodarowania odpadami. Co więcej, wymagają one stopniowego zmniejszania ilości składowanych odpadów. Państwa członkowskie powinny podjąć niezbędne kroki, aby do 2030 r. wszystkie odpady komunalne nadające się do recyklingu lub odzysku nie były przyjmowane na składowiska odpadów, ponadto do 2035 r. ilość składowanych odpadów komunalnych powinna być zmniejszona do 10% ich całkowitej masy. Celem wprowadzenia powyższych przepisów jest również zapobieganie powstawaniu odpadów opakowaniowych, a zarazem zachęcanie do wykorzystywania opakowań wielokrotnego użytku. Zgodnie z dyrektywami do 2035 r. Polska powinna osiągnąć poziom 65% przygotowania do ponownego użycia i recyklingu odpadów komunalnych (Sieroń 2021). Dlatego tak ważny jest rozwój selektywnej zbiórki odpadów w naszym kraju, dzięki której odpady z tworzyw sztucznych i szkła mogą zostać poddane procesowi recyklingu.

Co roku w Europie zostaje wygenerowane 25,8 mln ton odpadów z tworzyw sztucznych. Największy odsetek odpadów z tworzyw sztucznych – 59% – stanowią opakowania. Procesowi recyklingu zostaje poddane mniej niż 30% ogółu odpadów z tworzyw sztucznych (European Commission 2018). Niski poziom ponownego wykorzystania tworzyw sztucznych spowodowany jest przez szereg czynników, takich jak (Czarnecka-Komorowska i Wiszumirska 2020):

- brak ciągłości i stabilności dostaw oczyszczonego i jednorodnego regranulatu o określonych właściwościach, uzyskanego w rezultacie recyklingu mechanicznego surowców wtórnych, a zarazem duża dostępność na rynku, często zanieczyszczonego regranulatu o niskiej jakości;
- trudności technologiczne napotymane podczas przeprowadzania procesu przetwarzania odpadów;
- niska cena najczęściej stosowanych w opakowalnictwie tworzyw ropopochodnych, np. poli(tereftalanu etylenu) (PET), polietylenu (PE), polipropylenu (PP) oraz polistyrenu (PS);
- ograniczone zaufanie konsumentów do opakowań wytworzonych z surowców pochodzących z odzysku materiałowego.

Czynnikami wpływającymi na trudność w osiągnięciu wyższego poziomu i lepszej jakości recyklingu są przede wszystkim zbyt mała ilość i jakość selektywnego zbierania i sortowania odpadów. Sortowanie ma istotne znaczenie, ponieważ pozwala uniknąć wprowadzania zanieczyszczeń do odpadów poddawanych recyklingowi,

a tym samym zapewnić bezpieczeństwo i wysoką jakość sortowanych materiałów. Główna rola w zwiększaniu świadomości społecznej i jakości systemów selektywnego zbierania odpadów spoczywa na władzach krajowych, regionalnych i lokalnych. Nie bez znaczenia pozostaje również rozszerzenie odpowiedzialności producenta, a także wprowadzanie systemu kaucji za opakowanie (European Commission 2018).

Najkorzystniejszym rozwiązaniem dotyczącym segregowania odpadów komunalnych jest ich sortowanie przez mieszkańców indywidualnych gospodarstw domowych. Sortowanie może być wspierane przez zakłady sortujące odpady, jednak takie rozwiązanie wymaga dodatkowych nakładów finansowych, co w konsekwencji staje się obciążeniem dla lokalnych władz (Marcinkowski i Kowalski 2012). Jak wspomniano powyżej, zdecydowana większość odpadów komunalnych to opakowania. Niektóre lokalne przepisy nakazują umycie lub opłukanie opakowań przed ich umieszczeniem w koszu na odpady. Ta kwestia jest regulowana w zasadach segregowania odpadów komunalnych ustalanych na szczeblu gminnym. Regulaminy utrzymania porządku i czystości na terenie gminy powinny przede wszystkim upowszechniać segregację odpadów wśród mieszkańców oraz dążyć do minimalizowania poziomu składowanych odpadów komunalnych. Ministerstwo Klimatu i Środowiska RP wskazuje, że nie ma technologicznego uzasadnienia wprowadzania dodatkowych obostrzeń dla mieszkańców związanych z myciem odpadów opakowaniowych przed wyrzuceniem do kosza, a zwłaszcza w sytuacji, gdy takie wymagania nie są stawiane przez podmioty zajmujące się przetwarzaniem odpadów. Woda używana do przygotowania odpadów do recyklingu jest surowcem o znacznej wartości ekonomicznej, ale także środowiskowej. Powstaje więc pytanie: czy mycie opakowań po żywności jest ekonomicznie i środowiskowo uzasadnione? Aby udzielić na nie odpowiedzi, dokonano przeglądu literatury, a także przeprowadzono badania, których wyniki zaprezentowano w kolejnych rozdziałach.

2. Przegląd literatury

W literaturze przedmiotu można znaleźć wiele wyników badań dotyczących oceny ekonomicznej i środowiskowej gospodarowania odpadów z tworzyw sztucznych. Nie wszystkie z badań to pełne analizy LCA, niektóre prezentują tylko zużycie energii i emisję dwutlenku węgla. Wszystkie publikacje analizują problem z perspektywy całego cyklu życia, brakuje natomiast badań uwzględniających sam proces przygotowania odpadów do recyklingu. Najczęściej wybieranymi wskaźnikami do oceny wpływu na środowisko są: potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP, *global warming potential*) oraz całkowite zużycie energii (TEU, *total energy use*).

Według Ferdous i in. (2021) tworzywa sztuczne mają szerokie zastosowanie ze względu na niewielką masę i wysoką wytrzymałość. Najczęściej stosowane tworzywa sztuczne to poli(tereftalan etylenu) (PET), polietylen wysokiej gęstości (HDPE), polichlorek winylu (PVC), polietylen niskiej gęstości (LDPE), polipropylen (PP) oraz polistyren (PS). Znajdują głównie zastosowanie jako opakowania do produktów spożywczych i przemysłowych oraz jako wyroby jednorazowego użytku, np. talerze,

sztuńce, kubki na napoje. Obecnie trwają dyskusje o sposobach zagospodarowania odpadów z tworzywa sztucznego, tj. czy powinny podlegać recyklingowi, termicznemu przekształcaniu lub deponowaniu na składowiskach odpadów. Opinie w tym temacie są podzielone, ponieważ wszystko zależy od perspektywy rozpatrywania danego zagadnienia: na problem można spojrzeć przez pryzmat zdrowia, czynników ekonomicznych oraz czynników środowiskowych. W podsumowaniu wyników badań dokonano porównania pomiędzy recyklingiem, spalaniem oraz składowaniem odpadów. Wykazano, że najmniejszy negatywny wpływ na środowisko ma recykling odpadów, a kolejno składowanie i spalanie. Recykling ma najniższe wskaźniki GWP i TEU, co pomaga ukierunkować wybór strategii zarządzania odpadami z tworzyw sztucznych z perspektywy globalnego ocieplenia i wykorzystania energii. Przed dokonaniem ostatecznej decyzji należy wziąć pod uwagę kilka istotnych kwestii dotyczących recyklingu odpadów z tworzyw sztucznych. Z każdej tony uzyskanego surowca wtórnego można wytworzyć taką samą ilość „nowego” tworzywa sztucznego, ale jakość i ekonomiczna wartość tych materiałów jest problematyczna. Ponadto tworzywa sztuczne mogą być poddane procesowi recyklingu tylko jedno- lub dwukrotnie bez znaczącej utraty czystości. Oznacza to, że recykling nie jest ostatecznym rozwiązaniem, ponieważ na końcu cyklu życia odpady z tworzyw sztucznych i tak zostaną składowane lub spalane. Co więcej, recykling jest najlepszym wyjściem z punktu widzenia środowiskowego, ale niekoniecznie z perspektywy ekonomicznej. Cena ropy naftowej jest głównym wyznacznikiem ekonomicznym pomiędzy recyklingiem a produkcją nowych tworzyw sztucznych. Pomimo to najlepszym rozwiązaniem z przedstawionych trzech opcji pozostaje recykling.

W podobny sposób zaprezentowane zostało gospodarowanie odpadami ze szkła. Na całym świecie tylko 21% odpadów z tego materiału podlega recyklingowi. Tak niski wynik może dziwić, biorąc pod uwagę fakt, że szkło nadaje się w 100% do recyklingu, a opakowania, takie jak butelki i słoiki mogą być poddawane przetworzeniu niezliczoną ilość razy. Oznacza to, że recykling szkła jest mniej szkodliwy dla środowiska w porównaniu z recyklingiem odpadów z tworzyw sztucznych. Przyjmuje się, że tworzywa sztuczne tracą swoje właściwości po około 7–9-krotnym przetworzeniu, co spowodowane jest skracaniem włókien po każdym procesie recyklingu. W szkłe znajdują się głównie składniki sodowo-wapniowo-krzemowe. Każda tona szkła z recyklingu pozwala zaoszczędzić tonę zasobów naturalnych, w tym np. krzemionkę. Problemem jest stłuczka szklana, która zagraża nie tylko bezpieczeństwu pracowników zakładów przetwarzających odpady, ale może również powodować awarię w zakładzie, a w konsekwencji podnieść koszt przetwarzania. Co więcej, rozbite szkło jest trudno posortować pod względem barwy, co jest niezwykle istotne ze względu na różne temperatury topnienia każdej z frakcji. Ponadto duża masa szkła zwiększa koszty jego transportu (Ferdous i in. 2021).

Podobne wnioski w kwestii tworzyw sztucznych formułują Bernardo i in. (2016), zaznaczając jednocześnie, że narzędzie takie jak LCA oraz analiza ekonomiczna mogą pomóc w podjęciu właściwej decyzji o metodzie zagospodarowania odpadów. Wskaźniki GWP i TEU w większości przypadków wskazywały, że to recykling ma najmniejszy wpływ na środowisko, aczkolwiek nie we wszystkich przypadkach. Taka

niejednorodność wyników może być konsekwencją działania kluczowych czynników, takich jak: rodzaj materiału pochodzącego z recyklingu, uniknięcie zużycia energii dzięki jej odzyskowi ze spalania, rodzaj materiału, jakiego wytworzenia udało się uniknąć dzięki procesowi recyklingu oraz ram czasowych składowania odpadów. W niektórych publikacjach pojawiają się również kategorie wpływu na środowisko, takie jak: współczynnik zmniejszenia zasobów abiotycznych (*depletion of abiotic resources*), współczynnik zakwaszenia (*acidification potential*), współczynnik eutrofizacji (*eutrophication potential*). Również w tym wypadku wyniki są spójne i wskazują jednoznacznie na recykling. Podczas dokonywania oceny ekonomicznej należy wziąć pod uwagę zarówno przychody, jak i koszty generowane podczas gospodarowania odpadami. W przypadku recyklingu i spalania z odzyskiem energii znaczące dochody można uzyskać ze sprzedaży materiałów i wytworzonej energii. Satysfakcjonujący wynik finansowy można osiągnąć, integrując ze sobą zakłady sortowania i przetwarzania tworzyw sztucznych. Opierając się na innych badaniach, można stwierdzić, że ze środowiskowego i ekonomicznego punktu widzenia recykling materiałowy pojemników z tworzyw sztucznych jest porównywalny z ich spalaniem (Bernardo i in. 2016).

W literaturze istnieje szereg publikacji dotyczących kosztów recyklingu odpadów komunalnych. Bohm i in. (2010) dokonali porównania kosztów zbiórki odpadów komunalnych, wywozu odpadów i programu recyklingu „przy krawężniku” (*curbside*). Badanie zostało przeprowadzone w losowo wybranych gminach w Stanach Zjednoczonych. Uzyskane wyniki wskazują, że koszty zbierania, oddzielania, przetwarzania, wprowadzania na rynek i transportu materiałów z recyklingu przewyższają koszty zbiórki i usuwania odpadów. Powodem takiego stanu rzeczy jest dodatkowy koszt wynikający z segregacji i przetwarzania materiałów nadających się do recyklingu. Stwierdzono, że koszty usuwania oraz recyklingu odpadów wymagają wsparcia finansowego z dwóch źródeł: od władz oraz od mieszkańców w postaci płaconych przez nich podatków (Bohm i in. 2010). Warto zaznaczyć, że koszty segregacji surowców wtórnych ponoszone przez mieszkańców gospodarstw domowych nie są uwzględnione przed odbiorem odpadów. Niewielu badaczy uwzględnia dodatkowy wysiłek ponoszony przez gospodarstwa domowe w związku z segregacją odpadów „u źródła”. Niektóre badania uwzględniają pewien rodzaj kosztów w postaci niedogodności związanych z segregacją odpadów (Marcinkowski i Kowalski 2012). Walker i in. (2004) jako dwie najczęściej występujące niedogodności wynikające z konieczności prowadzenia selektywnej zbiórki odpadów wymieniają muszki owocowe i odory. Niedogodności nasilają się zwłaszcza w okresie letnim, kiedy temperatura otoczenia powoduje szybszy rozkład odpadów. Jako rozwiązanie zaproponowano odbiór w okresie lipiec–sierpień organicznej frakcji odpadów raz na tydzień, a nie jak dotychczas – raz na dwa tygodnie. Przy takich założeniach koszt wyeliminowania uciążliwości wyniósłby 2,24 dol. na gospodarstwo domowe i 110 dol. na tonę odpadów organicznych. Można z dużą pewnością stwierdzić, że zaproponowane rozwiązanie nie wyeliminuje całkowicie niedogodności, ponieważ tydzień to wystarczająco dużo czasu, aby frakcja organiczna odpadów uległa biologicznemu rozkładowi, a w konsekwencji przyciągnęła owady i wydawała nieprzyjemny zapach. Tylko zwiększona częstotliwość odbioru może pomóc w rozwiązaniu problemu, co oczywiście wiąże się z jeszcze większymi kosztami.

Niektórzy naukowcy twierdzą, że sortowanie „u źródła” nie powinno być uwzględniane w analizie kosztów i korzyści, ponieważ ludzie czerpią satysfakcję z samego tylko przyczyniania się do poprawy warunków środowiskowych. Wysiłek domowników jest równoważony satysfakcją związaną z efektywnością recyklingu. Takie podejście zdaje się nie pasować do polskich warunków. Można je przyjąć w przypadku społeczeństwa o wysokiej świadomości ekologicznej. W Polsce, zwłaszcza wśród osób starszego pokolenia, ta świadomość jest raczej niska (Marcinkowski i Kowalski 2012). Powyższą tezę potwierdzają badania przeprowadzone przez ARC Rynek i Opinia oraz Forum Odpowiedzialnego Biznesu, zgodnie z którymi tylko 15% badanych odpowiedziało poprawnie na wszystkie pytania odnoszące się do selekcji odpadów. Oznacza to, że zaledwie 15% respondentów potrafiło poprawnie posegregować przykładowe artykuły podczas wyrzucania śmieci (Kubicka-Żach 2019). W odniesieniu do wprowadzonego w Polsce od 1 stycznia 2020 r. obowiązku segregacji odpadów należy stwierdzić, że wciąż potrzebne są działania zwiększające ekologiczną świadomość Polaków.

Problem bilansu kosztów i korzyści wynikających z przygotowania odpadów opakowaniowych po produktach spożywczych jest obecny w literaturze, wymaga jednak ujednoczenia metodyki prowadzonych badań. Jednak analizy ekonomiczne nie wyczerpują problemu. Selektywna zbiórka odpadów i recykling powinny przynosić korzyść nie tylko finansową, ale również środowiskową. Bilans wpływu na środowisko może być dokonany metodą oceny cyklu życia. Mimo potencjalnej możliwości istnieje niedobór publikacji naukowych prezentujących porównanie korzyści i strat środowiskowych związanych z przygotowaniem odpadów opakowaniowych do selektywnej zbiórki. W związku ze zidentyfikowaną w literaturze luką badawczą celem niniejszego rozdziału monografii jest wyznaczenie korzyści i strat środowiskowych procesu mycia odpadów opakowaniowych odbywającego się w gospodarstwach domowych. Ponadto zawarto porównanie aktualnego (2021 r.) bilansu ekonomicznego tego samego procesu z bilansem określonym dekadę temu (w 2012 r.).

3. Metodyka badań

Podstawą wykonanych analiz było określenie wartości odzyskiwanych materiałów opakowaniowych oraz straty finansowej wynikającej z procesu ich przygotowania do selektywnej zbiórki prowadzonego w gospodarstwach domowych. Wartość materiałów wyznaczano na podstawie pomiaru masy poszczególnych części składowych odpadów opakowaniowych (pojemnik, wieczko) za pomocą wagi o dokładności co najmniej 1 g. Podstawą określenia straty były pomiary zużytej wody oraz płynu do mycia naczyń. Zużycie wody (osobno zimnej i ciepłej) było wyznaczane na podstawie dokumentowanych fotograficznie odczytów liczników dokonywanych przed procesem mycia i po nim. Ilość detergentu określała liczba użytych kropli. Założenia przyjęte w badaniach to:

- 1) cena zimnej wody (zawierająca opłatę za odbiór ścieków) to 8,89 zł/m³,
- 2) cena ciepłej wody (zawierająca cenę wody zimnej, opłatę za odbiór ścieków oraz opłatę za podgrzanie) wynosi 38,75 zł/m³,

- 3) średnia cena płynu do mycia naczyń to 7,80 zł/l,
- 4) średnia objętość jednej kropli płynu do mycia naczyń to 47,6 mm³,
- 5) wartość surowców wtórnych przyjęto na podstawie ich aktualnych cen w Polsce:
 - szkło: 10 zł/t,
 - tworzywa sztuczne (polietylen, polipropylen): 300 zł/t,
 - złom żelazny: 900 zł/t,
 - aluminium: 4800 zł/t.

Przeprowadzone pomiary dostarczyły dane liczbowe dotyczące mycia 370 opakowań po różnych artykułach spożywczych (ketchup, dżem, musztarda, majonez, buraki, chrzan, krem chrzanowy, koncentrat pomidorowy, czekolada, konfitura owocowa, miód, korniszony, papryka czerwona, papryka chili, pasta ogórkowa, klopsiki, szarlotka, szczaw, żurawina, sałatki, masło, margaryna, śmietana, twaróg, jogurt, kefir, serki, budyń, mleko czekoladowe, sosy do mięs obiadowych). Aby uwzględnić różnorodność nawyków związanych ze zmywaniem i zużyciem wody, badaniom poddano 118 osób reprezentujących różne gospodarstwa domowe.

Na podstawie uzyskanych danych ilościowych dokonano analiz umożliwiających:

- opracowanie bilansu ekonomicznego korzyści (związanych z wartością surowców wtórnych) i strat (wynikających ze zużycia wody i detergentu),
- porównanie wykonanego bilansu z analogicznym bilansem opracowanym dekadę wcześniej,
- porównanie korzyści środowiskowej (wynikającej z odzyskiwanych materiałów opakowaniowych) do obciążenia środowiska (związanego ze zużyciem wody i energii potrzebnej do jej podgrzania oraz detergentu) metodą oceny cyklu życia.

Przyjęty model badań wpływu na środowisko przedstawiono na rysunku 1. Białe strzałki oznaczają korzyść środowiskową, natomiast czarne strzałki symbolizują stratę (negatywny wpływ na środowisko). Należy podkreślić, że niniejszy model uwzględnia korzyści i straty środowiskowe, a nie ekonomiczne. W związku z tym nie jest brany pod uwagę koszt wykonanej pracy przez mieszkańców gospodarstw domowych. Zakłada się również, że wpływ na środowisko transportu odpadów jest taki sam, niezależnie od tego, czy zostały poddane procesowi wstępnego przygotowania do selektywnej zbiórki, czy nie. Wobec tego wpływy te niwelują się.

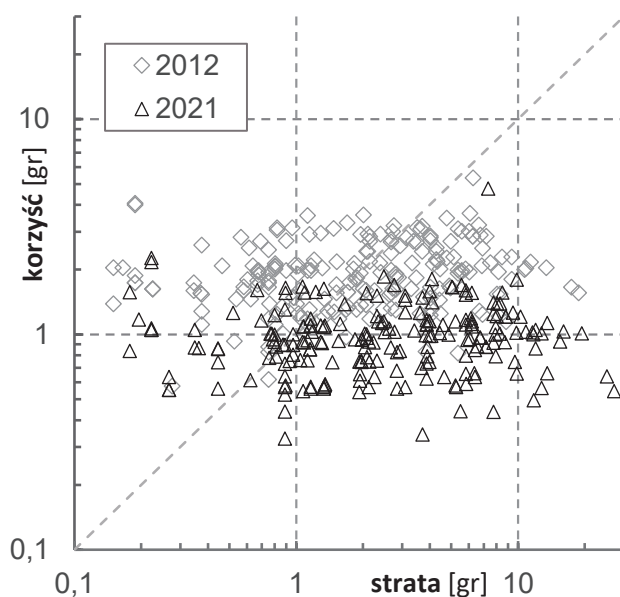


Rys. 1. Przyjęty model badań wpływu na środowisko

Dane technologiczne procesów przemysłowych i ich wpływu na środowisko zostały zaczerpnięte z bazy danych ecoinvent 3.8 (Wernet i in. 2016). Analizę oceny wpływu przeprowadzono metodą ReCiPe *Endpoint hierarchist, average* (H, A). Jako jednostkę funkcjonalną przyjęto pojedyncze opakowanie poddawane myciu.

4. Wyniki badań

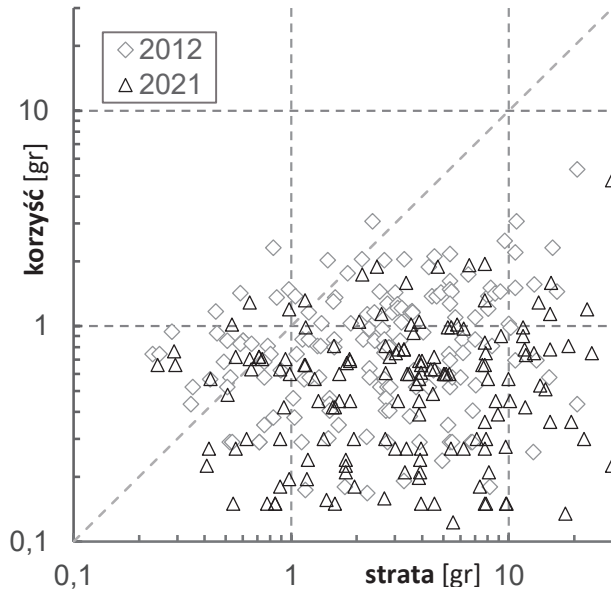
Na rysunku 2 przedstawiono porównanie wartości ekonomicznej szklanych opakowań odpadowych z kosztem ich mycia. Ponieważ zakres uzyskanych danych liczbowych obejmuje kilka rzędów wielkości, wyniki zaprezentowano w układzie podwójnie logarytmicznym. Na osi poziomej zaznaczono stratę ekonomiczną, korzyści natomiast – na osi pionowej. Punkty leżące powyżej przekątnej wykresu odnoszą się do sytuacji, w której korzyść ekonomiczna przewyższa stratę. Wyniki uzyskane w 2012 r. pokazują, że nieco mniej niż połowa badanych przypadków (48%) reprezentuje taką sytuację, natomiast w pozostałych przypadkach (52%) widoczna jest przewaga strat nad korzyściami. Wyniki uzyskane w 2021 r. wskazują na znaczące pogorszenie się sytuacji: zdecydowana większość punktów doświadczalnych (79%) leży poniżej przekątnej wykresu, co wskazuje, że proces mycia przygotowujący odpady do selektywnej zbiórki nie jest uzasadniony ekonomicznie.



Rys. 2. Porównanie wartości szklanych opakowań odpadowych i kosztów ich mycia

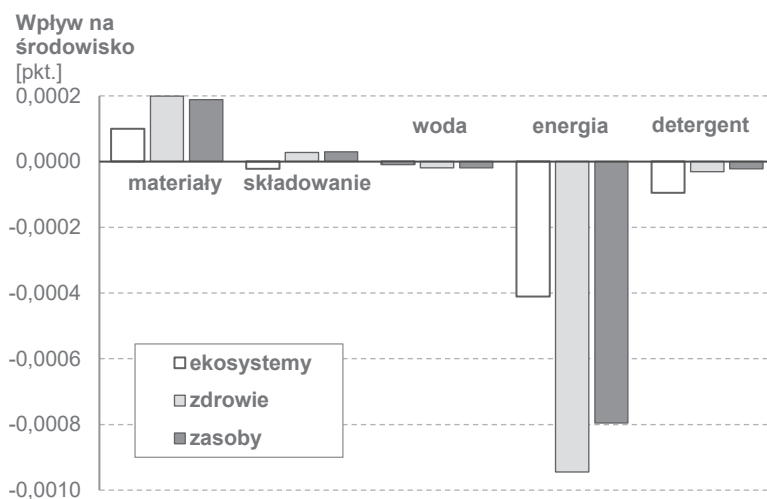
Na rysunku 3 przedstawiono analogiczny bilans ekonomiczny dla opakowań odpadowych z tworzyw sztucznych. Wyniki pokazują, że już w 2012 r. w większości przypadków (83%) mycie zużytych opakowań było nieopłacalne. Dane uzyskane

aktualnie (w 2021 r.) wskazują, że w ciągu dekady niekorzystne zjawisko pogłębiło się – jedynie w niewielkiej liczbie przypadków (9%) przygotowanie odpadów w gospodarstwach domowych do selektywnej zbiórki było uzasadnione ekonomicznie. Pogorszenie się opłacalności mycia odpadów w latach 2012–2021 wynikało głównie ze spadku cen surowców wtórnych, co było szczególnie widoczne w przypadku opakowań szklanych: cena słuczki zmniejszyła się w tym czasie kilkukrotnie.



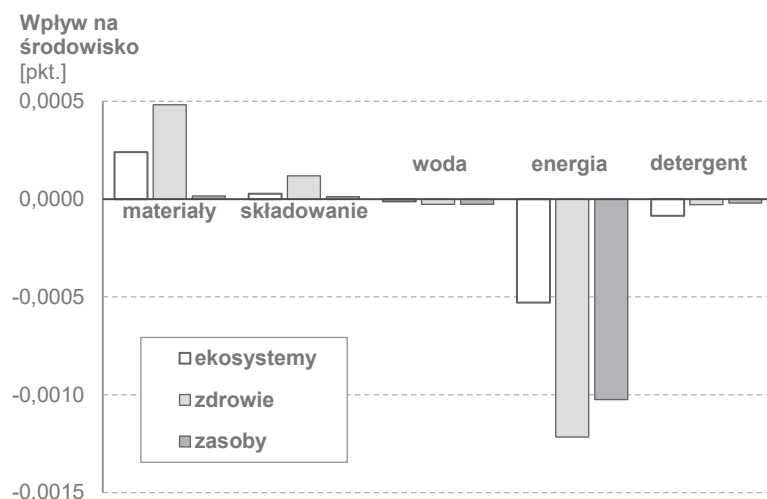
Rys. 3. Porównanie wartości opakowań odpadowych z tworzyw sztucznych i kosztów ich mycia

Po określeniu opłacalności ekonomicznej przygotowania odpadów do selektywnej zbiórki przeprowadzono badania dotyczące uzasadnienia środowiskowego tego procesu. Zgodnie z przedstawioną metodyką oddziaływanie na środowisko określono metodą oceny cyklu życia. Na rysunku 4 przedstawiono uśrednione wskaźniki (reprezentujące średnie wartości dla wszystkich danych doświadczalnych dotyczących opakowań szklanych) punktów końcowych dla trzech kategorii szkód: zdrowia, ekosystemów oraz zasobów. Jednostką wpływu na środowisko są punkty metody ReCiPe *Endpoint hierarchist, average* (H, A). Poszczególne serie na wykresie słupkowym (rys. 4) odzwierciedlają wpływ na środowisko wynikający z odzysku materiałów zawartych w odpadach, braku konieczności składowania tych odpadów, jak również zużycia wody i energii potrzebnej do jej podgrzania oraz wykorzystania pływu do mycia naczyń. Wśród elementów o pozytywnym wpływie na środowisko dominowały odzyskane materiały, natomiast negatywny wpływ na środowisko został zdominowany przez zużycie energii. Relacja między wskaźnikami oddziaływania pozytywnego i negatywnego wskazuje na brak uzasadnienia ekologicznego procesu mycia zużytych opakowań. Strata środowiskowa przewyższa korzyść 3,8–6,6 razy w zależności od kategorii szkód.



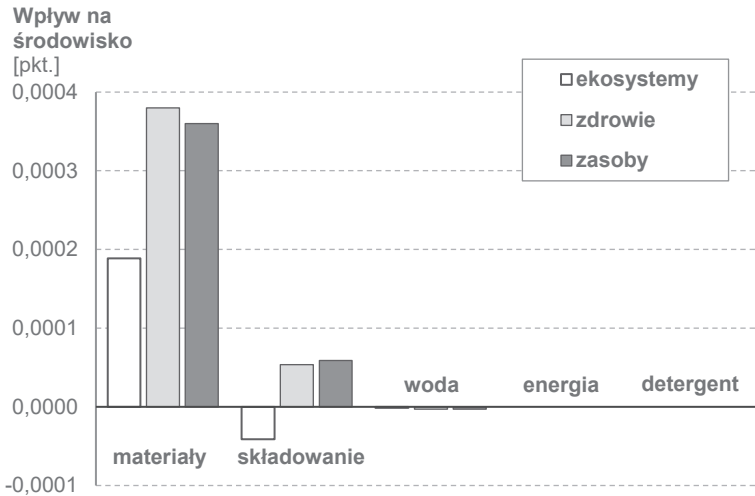
Rys. 4. Uśredniony wpływ na środowisko mycia szklanych opakowań odpadowych

Na rysunku 5 przedstawiono uśrednione wskaźniki punktów końcowych dla przypadku opakowań z tworzyw sztucznych. Relacje między wartościami wskaźników przedstawionych na omawianym wykresie są analogiczne do tych z rysunku 4. Pozytywny wpływ na środowisko zdominowany jest przez odzyskane materiały, natomiast negatywny – przez zużycie energii. Również w przypadku opakowań z tworzyw sztucznych wartości bezwzględne wpływu na środowisko wskazują na brak uzasadnienia ekologicznego procesu mycia. W zależności od kategorii szkód strata środowiskowa przewyższa korzyść 2,1–2,3 razy w kategorii ekosystemów i zdrowia oraz aż 37,3 razy w kategorii zasobów.



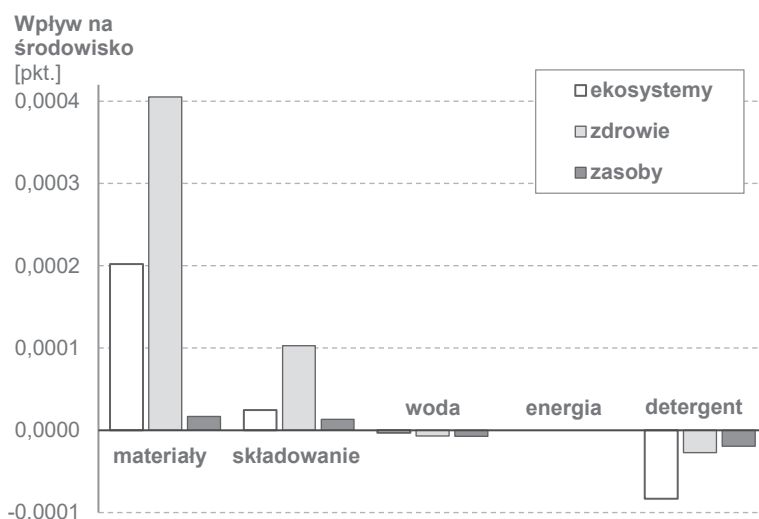
Rys. 5. Uśredniony wpływ na środowisko mycia opakowań odpadowych z tworzyw sztucznych

Omówione powyżej wyniki są uśrednione, to znaczy, że uwzględniają zarówno takie przypadki, w których w procesie mycia używano tylko wody ciepłej, jak i przypadki użycia jedynie wody zimnej. Ponieważ negatywny wpływ na środowisko wynikał głównie ze zużycia energii potrzebnej do uzyskania wody ciepłej, poniżej przedstawiono wybrane wyniki pojedynczych doświadczeń, w których do mycia używano jedynie wody zimnej. Na rysunku 6 przedstawiono wskaźniki punktów końcowych w przypadku mycia pojedynczego opakowania szklanego, dla którego uzyskano największą nadwyżkę korzyści środowiskowej nad stratami. Do mycia w tym przypadku nie używano ani ciepłej wody, ani detergentu. Relacja między wskaźnikami pozytywnego i negatywnego oddziaływania na środowisko przedstawia się przeciwnie niż w przypadku wyników uśrednionych. Słupki reprezentujące korzyść ekologiczną są zdecydowanie wyższe niż słupki odzwierciedlające stratę. W ujęciu sumarycznym pozytywny wpływ na środowisko jest wyższy od negatywnego ponad dwa rzędy wielkości (niezależnie od kategorii szkód), proces mycia zużytych opakowań jest więc w tym przypadku zdecydowanie uzasadniony.



Rys. 6. Wpływ na środowisko mycia szklanego opakowania, dla którego uzyskano największą nadwyżkę korzyści środowiskowej nad stratami

Rysunek 7 przedstawia wskaźniki wpływu na środowisko w przypadku mycia pojedynczego opakowania wykonanego z tworzywa sztucznego, dla którego uzyskano największą nadwyżkę korzyści środowiskowej nad stratami. Do mycia w tym przypadku nie używano ciepłej wody, jednak użyto detergentu. Mimo że negatywny wpływ na środowisko wykorzystanego płynu do mycia naczyń jest znacznie większy od wpływu zużytej wody, w ujęciu sumarycznym przeważa oddziaływanie pozytywne. W zależności od rozpatrywanego punktu końcowego korzyść środowiskowa jest wyższa od straty 2,6 razy w kategorii ekosystemy, 14,8 razy w kategorii zdrowie oraz o 12% w kategorii zasoby. Proces mycia zużytych opakowań jest w tym przypadku środowiskowo uzasadniony.



Rys. 7. Wpływ na środowisko mycia opakowania z tworzywa sztucznego, dla którego uzyskano największą nadwyżkę korzyści nad stratami

5. Podsumowanie

Obowiązujące w gminach regulaminy utrzymania porządku i czystości, a także niedogodności spowodowane odorami wydzielanymi przez odpady komunalne gromadzone w gospodarstwach domowych skłaniają ich mieszkańców do mycia zużytych opakowań po produktach spożywczych. Uzasadnienie tego procesu jest jednak kontrowersyjne i wymaga weryfikacji zarówno z finansowego, jak i środowiskowego punktu widzenia. Zaprezentowane uśrednione wyniki badań wskazują na to, że w przeciętnym przypadku mycie odpadowych opakowań wytworzonych ze szkła i tworzyw sztucznych nie jest uzasadnione ani ekonomicznie, ani środowiskowo. Mimo że w większości przypadków strata środowiskowa przewyższa korzyść, to jednak niektóre z pojedynczych wyników przedstawiają sytuację odwrotną. W skrajnie korzystnych przypadkach wskaźniki korzyści środowiskowej wielokrotnie przewyższają wartości strat. Główną przyczyną uzyskania odmiennych rezultatów w stosunku do wyników uśrednionych jest brak użycia ciepłej wody. Elementami najbardziej obciążającymi środowisko jest zużycie energii potrzebnej do podgrzania wody oraz wykorzystanie detergentu. Wpływ na środowisko prowadzonego w gospodarstwach domowych procesu mycia odpadów opakowaniowych po produktach spożywczych może być zredukowany, ale wymaga to działań zwiększających świadomość ekologiczną.

Najważniejsze wnioski płynące z zaprezentowanych wyników badań można sformułować następująco:

- 1) opłacalność ekonomiczna mycia opakowań po produktach spożywczych znacząco zmniejszyła się w stosunku do 2012 r., zwłaszcza w przypadku opakowań szklanych,

- 2) w większości przypadków wykazano brak uzasadnienia ekonomicznego dla mycia opakowań,
- 3) uśredniony sumaryczny wpływ na środowisko wynikający z przygotowania odpadów do selektywnej zbiórki jest negatywny,
- 4) czynnikiem najistotniej obciążającym środowisko jest proces wytwarzania energii cieplnej do podgrzania wody potrzebnej do mycia opakowań,
- 5) istotne obciążenie środowiska wynika również z wykorzystania płynu do mycia naczyń,
- 6) gdyby do mycia nie używano ciepłej wody i detergentu, proces przygotowania materiałów do recyklingu byłby uzasadniony środowiskowo,
- 7) redukcja wpływu na środowisko mycia odpadów opakowaniowych po produktach spożywczych wymaga działań zwiększających świadomość ekologiczną.

Literatura

- Bernardo C.A., Simões C.L., Costa Pinto L.M., 2016, *Environmental and Economic Life Cycle Analysis of Plastic Waste Management Options. A Review*. AIP Conference Proceedings 1779, 140001, <https://doi.org/10.1063/1.4965581>.
- Bohm R.A., Folz D.H., Kinnaman T.C., Podolsky M.J., 2010, *The costs of municipal waste and recycling programs*, Resources, Conservation and Recycling, 54, s. 864–871.
- Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. *A European Strategy for Plastics in a Circular Economy*, 2018, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0028&from=PL> [dostęp: 20.12.2021].
- Czarnecka-Komorowska D., Wiszumirska K., 2020, *Zrównoważone projektowanie opakowań z tworzyw sztucznych w gospodarce cyrkularnej*, Polimery, 65, 1, s. 8–17, <https://doi.org/10.14314/polimery.2020.1.2>.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/850 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 1999/31/WE w sprawie składowania odpadów, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L0850&from=PL> [dostęp: 20.12.2021].
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/852 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 94/62/WE w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0852&from=EN> [dostęp: 20.12.2021].
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/851 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2008/98/WE w sprawie odpadów, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L0851&from=PL> [dostęp: 20.12.2021].

- Ferdous W., Manalo A., Siddique R., Mendis P., Zhuge Y., Wong H.S., Lokuge W., Aravinthan T., Schubel P., 2021, *Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – A review on global waste generation, performance, application and future opportunities*, Resources, Conservation & Recycling, 173, s. 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105745>.
- Główny Urząd Statystyczny, 2021, <https://bdl.stat.gov.pl/BDL/metadane/podgrupy/223> [dostęp: 20.12.2021].
- Kubicka-Żach K., 2019, *Myc czy nie myć – segregacja śmieci wciąż sprawia kłopoty*, <https://www.prawo.pl/samorzad/myc-czy-nie-myc-segregacja-smieci-wciaz-sprawia-klopoty,486395.html> [dostęp: 22.12.2021].
- Marcinkowski A., Kowalski A.M., 2012, *The problem of preparation the food packaging waste for recycling in Poland*, Resources, Conservation and Recycling, 69, s. 10–16, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.004>.
- Ministerstwo Klimatu i Środowiska, *Zasady segregowania odpadów komunalnych*, <https://www.gov.pl/web/klimat/zasady-segregowania-odpadow-komunalnych> [dostęp: 21.12.2021].
- Sieroń B., 2021, *Zmiany w ustawie o odpadach wdrażające przepisy unijne*, https://samorzad.infor.pl/sektor/zadania/gospodarka_komunalna/5349653,Zmiany-w-ustawie-o-odpadach-wdrazajace-przepisy-unijne.html [dostęp: 20.12.2021].
- Walker S., Colman R., Wilson J., Monette A., Harley G., 2004, *The Nova Scotia GPI solid waste resource accounts*, Genuine Progress Index for Atlantic Canada, 7, s. 1–178.
- Wernet G., Bauer C., Steubing B., Reinhard J., Moreno-Ruiz E., Weidema B., 2016, *The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology*, The International Journal of Life Cycle Assessment, 21, s. 1218–1230.

ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE PRETREATMENT PROCESS OF PACKAGING WASTE FOR RECYCLING

Summary: Packaging wastes from food products can be a valuable recyclable material after the recycling process. However, their use depends on their initial preparation, which takes place in households. The aim of the research was to determine the environmental benefit resulting from the recycling of packaging materials and to compare it to the environmental loss related to the initial preparation process. In addition, the economic values of various materials and costs of their preparation were determined in order to compare the current results with the results obtained a one decade earlier. The environmental impact were performed using the Life Cycle Assessment (LCA), and specifically, the ReCiPe endpoint method. The obtained results indicated low environmental profitability of recycling preceded by preliminary waste preparation. The relation of environmental benefits to losses were different depending on the analyzed variant. A decrease in the profitability of packaging waste recovery in the analyzed period was demonstrated. The obtained results can be used in planning the effective management of recyclable materials and designing environmentally justified waste selective collection systems.

Keywords: packaging waste, LCA (Life Cycle Assessment), selective collection, recycling